

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FABRICAÇÃO DE COMPONENTES INJETADOS EM INSERTOS
PRODUZIDOS POR ESTEREOLITOGRAFIA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

RICARDO BORGES GOMIDE

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2000

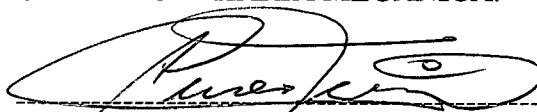
**FABRICAÇÃO DE COMPONENTES INJETADOS EM INSERTOS PRODUZIDOS POR
ESTEREOLITOGRAFIA**

RICARDO BORGES GOMIDE

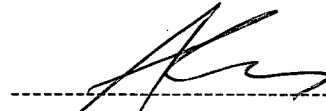
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

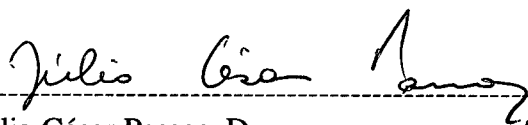
**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
FABRICAÇÃO, APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.**



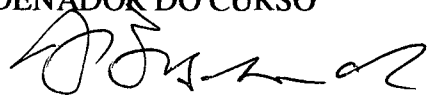
Prof. Aureo Campos Ferreira, Ph.D.
ORIENTADOR



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.
CO-ORIENTADOR

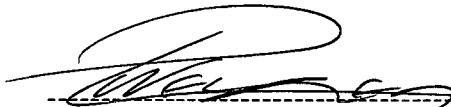


Prof. Júlio César Passos, Dr.
COORDENADOR DO CURSO

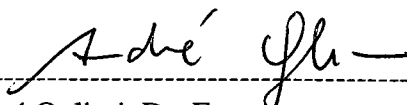


BANCA EXAMINADORA

Prof. Augusto José de Almeida Buschinelli, Dr. Ing.
PRESIDENTE



Prof. Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr.-Ing.



Prof. André Ogliari, Dr. Eng.

Meus sinceros agradecimentos a Deus, aos meus pais,
aos professores Aureo e Ahrens, ao amigo Lafratta,
a todo o pessoal do CIMJECT (sem exceções),
à equipe do PAT-PRONEX,
à empresa Precicast – Fundição de Precisão e aos seus funcionários,
à Escola Técnica Tupi
e a todos que me ajudaram de alguma forma na realização deste trabalho.

“Que a busca do novo continue movendo o homem.”

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
GLOSSÁRIO DE SIGLAS	XVI
RESUMO	XVIII
ABSTRACT	XIX
 1. INTRODUÇÃO.....	 1
1.1. ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	1
1.2. DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO.....	5
1.3. OBJETIVOS.....	6
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
 2. PROCESSOS COMERCIAIS DE FABRICAÇÃO POR CAMADAS.....	 9
2.1. FUNDAMENTOS DA FABRICAÇÃO POR ADIÇÃO DE CAMADAS.....	9
2.2. CATEGORIAS DE PROTÓTIPOS.....	11
2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA FABRICAÇÃO POR CAMADAS	12
2.4. DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS COMERCIAIS DE FABRICAÇÃO POR CAMADAS.....	14
2.4.1. <i>Estereolitografia (SL)</i>	14
2.4.2. <i>Sinterização a laser seletivo (SLS)</i>	16
2.4.3. <i>Fusão e deposição de materiais (FDM)</i>	18
2.4.4. <i>Solid Groung Curing (SGC)</i>	19
2.4.5. <i>Laminação de objetos para modelos (LOM)</i>	20
2.4.6. <i>Tecnologia de Laminação de Papel (PLT)</i>	21
2.4.7. <i>Sistema JP5 (JPS)</i>	22
2.4.8. <i>Impressão de objetos sólidos (SOP)</i>	23

2.4.9.	<i>Impressão tridimensional (3DP)</i>	24
2.4.10.	<i>Laser engineered net shaping (LENS)</i>	24
2.4.11.	<i>Fabricação topográfica de cascas (TSF)</i>	25
2.5.	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR CAMADAS	26
2.6.	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FERRAMENTAL RÁPIDO (<i>RAPID TOOLING</i>)	27
2.7.	DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DIRETOS DE FERRAMENTAL RÁPIDO	30
2.7.1.	<i>Fabricação direta de insertos de resina através da estereolitografia</i>	30
2.7.2.	<i>RapidTool</i>	30
2.7.3.	<i>Fabricação de moldes de cerâmica para microfusão</i>	31
2.7.4.	<i>Fabricação de moldes de metal (Metal tooling)</i>	32
2.7.5.	<i>Fabricação de eletrodos para eletroerosão por penetração</i>	32
2.8.	DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS INDIRETOS DE FERRAMENTAL RÁPIDO	33
2.8.1.	<i>Modelos de estereolitografia para microfusão (QuickCast)</i>	33
2.8.2.	<i>Keltool</i>	35
2.8.3.	<i>Fabricação de moldes por deposição metálica (Metal deposition tooling ou Spray metal tooling)</i> ..	36
2.8.4.	<i>Fabricação de moldes de silicone (silicone rubber tooling)</i>	38
2.8.5.	<i>Fabricação de moldes de epoxi (cast-epoxy tooling)</i>	39
2.8.6.	<i>Modelos de cera para microfusão</i>	41
2.8.7.	<i>Fabricação de moldes por microfusão</i>	42
2.8.8.	<i>Modelos para fundição em areia</i>	42
3.	FABRICAÇÃO DIRETA DE INSERTOS DE RESINA COM USO DA ESTEREOLITOGRAFIA	43
3.1.	DEFINIÇÃO.....	43
3.2.	PRINCIPAIS ETAPAS	43
3.3.	PREPARAÇÃO DAS PLACAS PORTA-CAVIDADES	45
3.4.	PROJETO DOS INSERTOS	45
3.4.1.	<i>Dimensões e contração</i>	46
3.4.2.	<i>Ângulos de saída</i>	46
3.4.3.	<i>Sistema de alimentação e ponto de injeção</i>	47
3.4.4.	<i>Espessura de casca</i>	48

3.4.5.	<i>Técnicas de refrigeração do inserto</i>	49
3.4.6.	<i>Sistema de extração</i>	52
3.4.7.	<i>Resolução do CAD</i>	53
3.5.	FABRICAÇÃO DOS INSERTOS POR ESTEREOLITOGRAFIA.....	54
3.5.1.	<i>Seleção da resina de estereolitografia</i>	55
3.5.2.	<i>Orientação espacial do inserto</i>	56
3.5.3.	<i>Projeto dos suportes para a fabricação</i>	58
3.5.4.	<i>Espessura de fatiamento</i>	60
3.5.5.	<i>Estilos de construção da estereolitografia</i>	60
3.5.6.	<i>Parâmetros de recobrimento (recoat)</i>	61
3.6.	PÓS-PROCESSAMENTO DOS INSERTOS	63
3.6.1.	<i>Limpeza</i>	63
3.6.2.	<i>Remoção de suportes</i>	64
3.6.3.	<i>Pós-cura</i>	64
3.6.4.	<i>Acabamento superficial</i>	65
3.7.	MONTAGEM DOS INSERTOS NAS PLACAS PORTA-CAVIDADES	69
3.8.	PREENCHIMENTO DA PARTE DE TRÁS DOS INSERTOS.....	70
3.8.1.	<i>Adição dos tubos de cobre</i>	70
3.8.2.	<i>Funções do preenchimento</i>	71
3.8.3.	<i>Materiais de preenchimento</i>	71
3.9.	USINAGEM DA PARTE DE TRÁS	73
3.10.	MONTAGEM DO MOLDE.....	74
3.11.	MOLDAGEM POR INJEÇÃO	75
4.	DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO	77
4.1.	ESCOPO DA PESQUISA	77
4.2.	ESTUDO DE CASO 1.....	77
4.2.1.	<i>Objetivos específicos</i>	77
4.2.2.	<i>Definição da peça 01</i>	78
4.2.3.	<i>Projeto dos insertos</i>	79

4.2.4.	<i>Fabricação dos insertos</i>	82
4.2.5.	<i>Preparação dos insertos</i>	84
4.2.6.	<i>Injeção das peças</i>	85
4.3.	ESTUDO DE CASO 2	85
4.3.1.	<i>Objetivos específicos</i>	85
4.3.2.	<i>Definição da peça 02</i>	86
4.3.3.	<i>Projeto dos insertos</i>	87
4.3.4.	<i>Fabricação dos insertos</i>	88
4.3.5.	<i>Preparação dos insertos</i>	90
4.3.6.	<i>Injeção das peças</i>	91
4.4.	ESTUDO DE CASO 3	92
4.4.1.	<i>Objetivos específicos</i>	92
4.4.2.	<i>Definição da peça 03</i>	92
4.4.3.	<i>Projeto dos insertos</i>	93
4.4.4.	<i>Fabricação dos insertos</i>	94
4.4.5.	<i>Preparação dos insertos</i>	95
4.4.6.	<i>Injeção das peças</i>	96
4.5.	ESTUDO DE CASO 4	97
4.5.1.	<i>Objetivos específicos</i>	97
4.5.2.	<i>Definição das peças 04, 05 e 06</i>	97
4.5.3.	<i>Projeto dos insertos</i>	98
4.5.4.	<i>Fabricação dos insertos</i>	100
4.5.5.	<i>Preparação dos insertos</i>	101
4.5.6.	<i>Injeção das peças</i>	102
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
5.1.	ESTUDO DE CASO 01	103
5.1.1.	<i>Tempo de fabricação</i>	103
5.1.2.	<i>Preenchimento com metais de baixo ponto de fusão</i>	105
5.1.3.	<i>Comportamento de falha dos insertos durante a moldagem</i>	108

5.2. ESTUDO DE CASO 02.....	110
5.2.1. <i>Tempo de fabricação</i>	111
5.2.2. <i>Comportamento de falha dos insertos</i>	112
5.2.3. <i>Aparência das peças produzidas</i>	113
5.2.4. <i>Temperatura dos insertos</i>	113
5.3. ESTUDO DE CASO 03.....	116
5.3.1. <i>Acabamento superficial</i>	116
5.3.2. <i>Preenchimento composto</i>	117
5.3.3. <i>Moldagem por injeção das peças</i>	118
5.4. ESTUDO DE CASO 04.....	118
5.4.1. <i>Incerteza dimensional de peças de cera injetadas</i>	119
5.4.2. <i>Incerteza dimensional durante a fabricação do inserto</i>	123
5.4.3. <i>Movimentos relativos</i>	125
5.4.4. <i>Tempo de ciclo de moldagem</i>	125
5.4.5. <i>Tempo de confecção dos insertos</i>	126
6. CONCLUSÃO.....	128
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE INSERTOS DE RESINA FABRICADOS POR ESTEREOLITOGRAFIA	128
6.2. SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	131
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134
ANEXO A – SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	146
ANEXO B – PRINCIPAIS FABRICANTES DE SISTEMAS DE FABRICAÇÃO POR CAMADAS	147
ANEXO C – EXPERIMENTO DE MOLDAGEM DE PÓS-METÁLICOS POR INJEÇÃO COM USO DE INSERTOS DE RESINA	149
C1. INTRODUÇÃO	149
C2. DEFINIÇÃO DA PEÇA 07	149
C3. PROJETO DO INSERTOS	150
C4. FABRICAÇÃO DOS INSERTOS	150

C5. PREPARAÇÃO DOS INSERTOS.....	151
C6. INJEÇÃO DAS PEÇAS E RECOMENDAÇÕES	151
ANEXO D – EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS.....	153
D1. EQUIPAMENTOS	153
D2. MATERIAIS	155

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades da resinas de SL utilizadas em máquinas SLA-250/30	56
TABELA 2 - Principais parâmetros do recobrimento	62
TABELA 3 - Propriedades de alguns possíveis materiais de preenchimento.....	73
TABELA 4 - Estudos de caso realizados neste trabalho	77
TABELA 5 - Descrição dos insertos confeccionados no estudo de caso 1	78
TABELA 6 - Parâmetros de construção do estilo <i>ACES</i> usados no estudo de caso 1.....	83
TABELA 7 - Parâmetros de recobrimento usados no estudo de caso 1	83
TABELA 8 - Parâmetros de injeção usados no estudo de caso 01.....	85
TABELA 9 - Descrição dos insertos confeccionados no estudo de caso 02	86
TABELA 10 -Parâmetros de recobrimento usados no estudo de caso 2.....	89
TABELA 11 -Parâmetros de injeção usados no estudo de caso 2	91
TABELA 12 -Parâmetros de injeção usados no estudo de caso 3	96
TABELA 13 -Parâmetros de construção dos insertos do estudo de caso 04	100
TABELA 14 -Parâmetros de injeção de cera para o estudo de caso 04	102
TABELA 15 -Média, desvio padrão, intervalo de confiança e máximos/mínimos observados	121

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Princípio da adição sucessiva de camadas [45].....	9
FIGURA 2 - Efeito de “degraus de escada” em função da espessura de camada	13
FIGURA 3 - Efeito de degraus de escada em superfícies inclinadas.....	14
FIGURA 4 - Princípio de construção do processo de estereolitografia.....	15
FIGURA 5 - Peças com suportes [50]	16
FIGURA 6 - Processo de sinterização a laser seletivo [58]	17
FIGURA 7 - Processo de fusão e deposição de materiais [59]	19
FIGURA 8 - Processo <i>Solid Ground Curing</i> [60]	20
FIGURA 9 - Processo de laminação de objetos para modelos [61]	21
FIGURA 10 - Processo de tecnologia de laminação de papel [64]	22
FIGURA 11 - Processo de impressão de objetos sólidos [65]	23
FIGURA 12 - Processo de impressão tridimensional [1].....	24
FIGURA 13 - Processo LENS [68]	25
FIGURA 14 - Classificação dos principais processos comerciais de fabricação por camadas....	27
FIGURA 15 - Classificação dos processos para ferramental rápido	29
FIGURA 16 - Etapas do processo <i>RapidTool</i> [70].....	31
FIGURA 17 - Passos para a obtenção do inserto pelo processo <i>Keltool</i> [80].....	36
FIGURA 18 - Etapas para a fabricação de um molde por pulverização metálica.....	37
FIGURA 19 - Etapas para a fabricação de peças com uso de moldes de silicone	39
FIGURA 20 - Principais passos para a fabricação de um molde de epoxi	40
FIGURA 21 - Etapas da fabricação direta de insertos por estereolitografia [31].....	44
FIGURA 22 - Preparação da placa porta-cavidades	45
FIGURA 23 - Inserto em forma de casca.....	46

FIGURA 24 - Uso de tubos de cobre para fazer a refrigeração do inserto	50
FIGURA 25 - Canais de refrigeração incorporados à casca do inserto (<i>conformal cooling</i>)	51
FIGURA 26 - Canais de guia para os pinos extratores no inserto.....	53
FIGURA 27 - Aproximação de um círculo por um polígono	54
FIGURA 28 - Fabricação dos insertos na máquina de estereolitografia.....	54
FIGURA 29 - Possíveis orientações espaciais para a fabricação de insertos em forma de casca. (a) Cavidade voltada para cima; (b) Cavidade voltada para baixo	58
FIGURA 30 - Suportes em um inserto de estereolitografia (vista em corte).....	59
FIGURA 31 - Processo de recobrimento na estereolitografia.....	62
FIGURA 32 - Insertos fabricados por estereolitografia	63
FIGURA 33 - Parede vertical fabricada por SL (microscópio, 300X) [28].....	66
FIGURA 34 - Perfil parabólico do laser na cura do polímero [36]	66
FIGURA 35 - Perda de tolerância dimensional após procedimentos de acabamento superficial	67
FIGURA 36 - Altura da linha de partição na montagem do inserto de SL no molde.....	69
FIGURA 37 - Insertos montados nos postigos das placas porta-cavidades	70
FIGURA 38 - Posicionamento dos tubos de cobre na parte de trás do inserto	71
FIGURA 39 - Insertos após a etapa de preenchimento.....	73
FIGURA 40 - Insertos sendo usinados na parte de trás	74
FIGURA 41 - Porta-moldes com insertos de estereolitografia.....	74
FIGURA 42 - Molde na máquina injetora	75
FIGURA 43 - Peça 01 (imagens do CAD).....	79
FIGURA 44 - Placa porta-cavidade (lado fixo) com postigo metálico.....	80
FIGURA 45 - Simulação da moldagem por injeção para a Peça 01	81
FIGURA 46 - Peça 02 (imagens do CAD).....	86
FIGURA 47 - Simulação da moldagem por injeção para a Peça 02	87

FIGURA 48 - Insertos-fêmea (a, b) e macho (c, d) do estudo de caso 2.....	89
FIGURA 49 - Localização esquemática do termopar no inserto-macho	90
FIGURA 50 - Peça 03 (vista isométrica no CAD)	92
FIGURA 51 - Inserto do estudo de caso 3 (lado fixo, imagens do CAD)	94
FIGURA 52 - Insertos do estudo de caso 3.....	95
FIGURA 53 - Insertos do estudo de caso 3 durante o preenchimento da parte de trás	96
FIGURA 54 - Peças 04, 05 e 06 (vistas isométricas no CAD).....	97
FIGURA 55 - Insertos do estudo de caso 04 (para Peça 04).....	98
FIGURA 56 - Insertos do estudo de caso 04 (para Peça 05).....	99
FIGURA 57 - Inserto do estudo de caso 04 (para Peça 06)	99
FIGURA 58 - Molde para injeção de cera	102
FIGURA 59 - Amostra de peças injetadas (estudo de caso 1).....	103
FIGURA 60 - Tempo de confecção de um conjunto de insertos (estudo de caso 01).....	105
FIGURA 61 - Quebra do inserto durante o preenchimento	106
FIGURA 62 - Bolhas no inserto que podem ocorrer durante o preenchimento da parte de trás	108
FIGURA 63 - Vida dos insertos do primeiro estudo de caso.....	110
FIGURA 64 - Amostra de peças injetadas (estudo de caso 2)	111
FIGURA 65 - Tempo de confecção de um conjunto de insertos (estudo de caso 02).....	111
FIGURA 66 - Vida dos insertos do segundo estudo de caso	112
FIGURA 67 - Temperaturas durante um ciclo de moldagem por injeção (para conjunto #8)...	114
FIGURA 68 - Temperaturas dos insertos preenchidos com estanho e <i>Metspec</i>	115
FIGURA 69 - Amostra de peças injetadas (estudo de caso 3)	116
FIGURA 70 - Amostra de peças injetadas (estudo de caso 4)	119
FIGURA 71 - Dimensões medidas nas peças de cera injetadas	120
FIGURA 72 - Incerteza dimensional de peças do tipo #4	121

FIGURA 73 - Incerteza dimensional de peças do tipo #5	122
FIGURA 74 - Incerteza dimensional de peças do tipo #6	122
FIGURA 75 - Incerteza dimensional absoluta durante a fabricação do inserto	124
FIGURA 76 - Comparação de tempo de ciclo durante a moldagem de cera	126
FIGURA 77 - Desenho esquemático do sistema de aquisição de dados	146
FIGURA 78 - Peça 07 (imagens do CAD).....	149
FIGURA 79 - Insertos do experimento com moldagem de pós-metálicos (imagens do CAD). 150	

GLOSSÁRIO DE SIGLAS

SIGLA	SIGNIFICADO
3D	Tridimensional
3DP	<i>Tridimensional Printing</i> ou Impressão Tridimensional
ACES	<i>Accurate Clear Epoxy Solid</i> , um estilo de construção da estereolitografia
CAD	<i>Computer Aided Design</i> ou Projeto Auxiliado por Computador
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> ou Engenharia Auxiliada por Computador
DSPC	<i>Direct Shell Production Casting</i> ou Produção Direta de Cascas Cerâmicas
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> ou Fusão e Deposição de Materiais
JPS	<i>JP System 5</i> ou Sistema JP5
LENS	<i>Laser Engineering Net Shaping</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> ou Laminação de Objetos para Modelos
PEAD	Polietileno de alta densidade
PIM	<i>Powder Injection Molding</i> ou Moldagem de Pós-Metálicos por Injeção
PLT	<i>Paper Lamination Technology</i> ou Tecnologia de Laminação de Papel
PP	Polipropileno
RP	<i>Rapid Prototyping</i> ou Prototipagem Rápida (Fabricação por Camadas)
RT	<i>Rapid Tooling</i> ou Ferramental Rápido
RTV	<i>Room Temperature Vulcanization</i> ou Vulcanização de Silicone à Temperatura Ambiente
SAHP	<i>Selective Adhesive Hot Press</i> ou Prensa Aquecida de Adesão Seletiva
SGC	<i>Solid Ground Curing</i>
SL	<i>StereoLithography</i> ou Estereolitografia
SLA	<i>StereoLithography Apparatus</i> ou Máquina de Estereolitografia
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> ou Sinterização a Laser Seletivo
SOP	<i>Solid Object Printer</i> ou Impressão de Objetos Sólidos

STL	<i>Stereolithography Files</i> , formato padrão de arquivos para PR
TSF	<i>Topographic Shell Fabrication</i> ou Fabricação Topográfica de Cascas

RESUMO

Diversas atividades industriais, como os setores de plástico e microfusão, requerem um molde. Contudo, o período de desenvolvimento de moldes, por métodos convencionais, é longo. Visando reduzir esse tempo, novas tecnologias foram e estão sendo desenvolvidas, como os processos de fabricação por camadas (prototipagem rápida). Todavia, por ser recente, há falta de informações relacionadas ao seu uso na construção de ferramentas. O objetivo deste trabalho foi investigar e comprovar o uso de um processo comercial de fabricação por camadas, a estereolitografia, na construção direta de ferramentas para moldagem por injeção. A pesquisa foi conduzida através da realização de estudos de caso, onde insertos de resina termofixa foram confeccionados para a produção, por moldagem por injeção, de sete tipos de peças, com diferentes complexidades geométricas e em materiais distintos (termoplásticos, cera para microfusão e pós-metálicos). São abordados aspectos relacionados a possíveis alterações de desvio dimensional durante a fabricação de insertos e o uso de materiais alternativos para preenchimento da parte traseira de insertos. Adicionalmente, é realizada uma comparação entre insertos de estereolitografia e de aço, ambos com movimentos relativos, em termos de desvio dimensional, tempo de fabricação e tempo de ciclo de moldagem.

ABSTRACT

Several industrial areas like plastic and investment casting sectors require a mold. However, the development of molds, using conventional methods, is highly time consuming. To minimize the lead-time, new technologies are being investigated, like layer-manufacturing processes (rapid prototyping). Nevertheless, there is not enough information about the use of these new methods on the fabrication of molds. This work aims to investigate the use of a commercial rapid prototyping process, the stereolithography, into the direct manufacturing of injection molding cavities. Case studies were carried out with stereolithography inserts shells being tested in production of seven injected parts, with different geometric complexity and using distinct materials, like engineering thermoplastics, investment casting wax and metal powder. Some studies were performed, regarding to changes on dimensional accuracy during inserts manufacturing and about the use of alternative backfilling materials, with reference to that material indicated in bibliography. Additionally, stereolithography and steel inserts, both with side actions, were compared, based on dimensional accuracy of injected parts and the time required to produce both inserts.

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Num cenário internacional, cada vez mais globalizado, a velocidade com que um novo produto é colocado no mercado torna-se um fator crucial para o aumento de competitividade. Dessa forma, é imperativo, não só para a sobrevivência, mas também para o crescimento de qualquer empresa, que novos produtos, de qualidade comprovada, sejam lançados no mercado, com maior frequência, apresentando um amplo e variado espectro de modelos, a preços mais competitivos [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

No que tange especificamente ao setor de componentes de plástico injetados, a produção da primeira peça, por métodos tradicionais, só é possível após o projeto e a fabricação do molde, normalmente através de usinagem em aço ou alumínio [8]. O que geralmente se percebe é que esta etapa não é realizada pela mesma empresa que produz o componente de plástico, sendo o serviço terceirizado. As ferramentarias, empresas responsáveis pela execução desse serviço, são cada vez mais pressionadas a desenvolver todo o molde, fornecê-lo ao cliente e receber o pagamento apenas após aprovação do molde com a injeção de um pequeno lote de peças, no material final de produção.

Fato similar ocorre em empresas de microfusão (*investment casting*), onde é comum seus clientes exigirem que a confirmação do contrato de produção ocorra após a aprovação de uma pequena série de peças. Pela maneira tradicional, os modelos para microfusão, em cera, são fabricados por meio do processo de moldagem por injeção e posteriormente recobertos com uma casca cerâmica. Na etapa inicial de sinterização dessa casca, a cera é removida, liberando o espaço no qual o metal fundido será vazado para produzir a peça definitiva. Dessa forma, este processo também requer um molde, no caso, para injeção de cera.

Contudo, o tempo de desenvolvimento e fabricação de um molde, para então obter a primeira peça injetada (seja em plástico ou cera), é longo, normalmente de noventa a cento e vinte dias [9, 10]. Num mercado competitivo, este período torna-se cada vez menos admitido [4].

Ainda na fase de desenvolvimento do produto injetado, uma prática que vem crescendo nestes setores é a de confeccionar protótipos, para diversas finalidades como, por exemplo, verificar sua estética, fazer estudos de montagem e interferência, realizar análise de mercado, estudo de embalagens e validação ergonômica, corrigindo assim, se for preciso, erros de projeto nas fases iniciais, antes do desenvolvimento do molde. É mais fácil entender um objeto físico tridimensional do que sua representação computacional em CAD ou realidade virtual [1, 11].

Buscando encurtar o tempo de desenvolvimento de produtos, através da produção rápida de um pequeno lote de objetos físicos (seja eles protótipos ou peças), tecnologias CAE/CAD/CAM e **processos de fabricação por camadas** (*Layer Manufacturing*, *Solid Free Form Fabrication* ou *Rapid Prototyping*) foram e ainda estão sendo desenvolvidas [1, 3, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Como o primeiro sistema comercial de fabricação por camadas esteve disponível só após 1988, depois do advento dos computadores, tal fato possibilitou sua natureza de “manufatura integrada por computador”, desde seu surgimento [17]. A fabricação por camadas refere-se aos diversos processos onde um objeto físico é construído diretamente de sua representação eletrônica em CAD, através do princípio da adição sucessiva de finas camadas de material [1, 18, 19, 20, 21, 22].

A fabricação por camadas possui também outras aplicações, como na área médica, por exemplo. Modelos físicos de órgãos humanos podem ser construídos a partir de dados obtidos por tomografia computadorizada, para, por exemplo, desenvolvimento de próteses personalizadas, planejamento de cirurgias, principalmente as realizadas no crânio, e aprendizado de alunos de medicina [1, 20, 21, 23, 24].

Devido também à flexibilidade do princípio de fabricação, pela adição sucessiva de camadas, para gerar diferentes formas geométricas, existe uma tendência em fabricar produtos personalizados, modelos únicos (*“one of a kind”*) através da fabricação por camadas. Este “conceito” pode ser aplicado não somente em produtos de engenharia, mas, por exemplo, nas artes (esculturas, jóias, etc.) [25, 26].

Em algumas aplicações, é importante ainda, antes de partir para a etapa de produção, construir protótipos para testes de engenharia. Isto normalmente exige que sejam fabricados com os mesmos materiais de produção (material das peças definitivas, a serem colocadas no mercado) para assim apresentarem propriedades semelhantes aos produtos acabados. No entanto, existe atualmente uma limitação dos diversos processos de fabricação por camadas no que se refere aos materiais que podem ser utilizados, o que dificulta a construção de protótipos funcionais (submetidos às mesmas condições de uso do produto final). Além disso, mesmo quando a fabricação por camadas é capaz de utilizar os materiais de produção, os objetos produzidos podem apresentar propriedades diferentes, haja visto que o processo a ser utilizado na produção definitiva possui características diferentes.

Um fato peculiar neste setor é que a empresa que desenvolveu um determinado processo é proprietária de uma tecnologia exclusiva, i.e., com características próprias, tais como princípio de funcionamento, materiais utilizados para fabricação, incerteza dimensional e tempo de fabricação. Embora todos os processos produzam objetos físicos (maquetes, protótipos, ferramentas e/ou peças), como a tecnologia varia de forma significativa de fabricante para fabricante, mesmo baseando-se no mesmo princípio de fabricação (adição sucessiva de camadas), sempre haverá um processo mais adequado para uma aplicação específica [2, 13, 27].

A estereolitografia (*Stereolithography, SL*), que foi o primeiro processo de fabricação por camadas desenvolvido, estando disponível comercialmente desde 1988, destina-se à construção de objetos físicos a partir de um modelo em CAD tridimensional, independente da complexidade

da forma geométrica da peça, através da fotopolimerização de resinas, à base de epóxi ou acrílico, por um feixe de raios laser ultravioleta, cuja movimentação é controlada por um programa computacional [1].

Visando, entre outras coisas, suprir a limitação atual de materiais que podem ser utilizados pela fabricação por camadas, iniciou-se o desenvolvimento dos **processos de fabricação de ferramental rápido** (*rapid tooling, RT*), que nada mais é do que uma aplicação da própria fabricação por camadas, mas agora focada na fabricação, direta ou indireta, de ferramentas a serem utilizadas em outros processos, como, por exemplo, moldes para moldagem por injeção, eletrodos para eletroerosão e modelos de fundição para microfusão [1, 2, 13, 28]. Através dessas “ferramentas rápidas”, torna-se possível a produção de protótipos funcionais, ou, dependendo da aplicação, pequenos lotes de peças, utilizando o mesmo material e processo a ser aplicado na produção final. Em alguns casos, pode-se inclusive produzir ferramentas finais, para produção de médios e grandes lotes [29, 30, 31].

Essas novas tecnologias e processos têm despertado o interesse, por exemplo, das áreas que requerem uma ferramenta para moldagem por injeção como, por exemplo, dos setores de plástico, de microfusão [107] e de injeção de pós-metálicos. Contudo, é importante salientar que, no estágio atual de desenvolvimento, várias dessas ferramentas rápidas não competem diretamente com os moldes definitivos, em aço, em situações onde se precisa de um alto volume de produção, mas visam, entre outras coisas, auxiliar o desenvolvimento do produto, produzindo pequenas séries de peças e/ou protótipos antes da fabricação do molde definitivo [30, 31]. Acredita-se que, no futuro, a manufatura por camadas torne-se viável também para a produção direta e seriada de peças, inclusive com diversas cores [32], não somente para um produto único, como um molde ou um protótipo. Esta tendência é conhecida como **fabricação rápida** (*rapid manufacturing, RM*) [2, 3, 28, 29, 34].

1.2.DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO

O Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, através do núcleo PAT/PRONEX, que tem como um dos objetivos desenvolver e ampliar competência em tecnologias envolvidas no processo de moldagem por injeção, vem iniciando pesquisas relacionadas ao uso da fabricação por camadas como uma ferramenta de auxílio ao desenvolvimento e fabricação de componentes injetados, onde uma máquina de estereolitografia foi adquirida.

Dos diversos processos de manufatura por camadas, a estereolitografia é atualmente um dos mais difundidos, apresentando o maior número de máquinas instaladas no mercado. Possui diversas aplicações na engenharia, algumas ainda em fase de desenvolvimento, que vão desde a fase inicial de projeto de produtos (protótipos conceituais) à de produção (fabricação de moldes, por exemplo).

São vários os processos de fabricação de ferramental rápido. Apenas baseados ou que fazem uso da estereolitografia são oito, conforme serão descritos no Capítulo 2. Mesmo existindo diversos processos, ainda não existe uma forma consensual de classificá-los. No entanto, uma possível classificação pode estar relacionada à forma na qual a ferramenta é fabricada [34, 35]: direta, quando o produto da fabricação por camadas, após algumas etapas de preparação, é a própria ferramenta; ou indireta, quando o produto da fabricação por camadas é um modelo que será utilizado para a construção da ferramenta através de outro processo.

Dos oito processos de ferramental rápido, baseados ou que utilizam a estereolitografia, apenas um pode ser usado para a fabricação direta de insertos, em resina termofixa à base de epoxi. Após preparados e montados em um porta-moldes, estes insertos podem ser utilizados para a produção de componentes injetados.

No entanto, este processo ainda não é livre de problemas, encontrando-se em fase de aprimoramento [36]. Uma de suas maiores limitações é a baixa resistência mecânica dos insertos, o que resulta numa baixa produção, quando comparados aos moldes de aço. Isto é acentuado por temperaturas e pressões excessivas na cavidade, inerentes ao processo de moldagem por injeção, haja visto ainda que a resina de estereolitografia não é um material bom condutor de calor, como os metais, e possui uma baixa temperatura de transição vítrea. A baixa condutividade térmica da resina faz também com que seja necessário um ciclo de injeção longo que, por sua vez, pode alterar as propriedades mecânicas da peça injetada [37]. Outro problema é o lascamento do inserto, nas regiões próximas à linha de partição, durante a extração da peça, devido à aderência da peça no inserto [30]. Sabe-se que sua vida é também influenciada pelo projeto do molde, tipo do material injetado, tipo de resina fotopolimérica usada na fabricação dos insertos e pelos próprios parâmetros do processo de estereolitografia, porém, por ser recente, ainda faltam estudos à respeito de como essas e outras variáveis podem influenciar a vida da ferramenta e a qualidade das peças produzidas [30, 31, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43].

1.3.OBJETIVOS

Como uma primeira pesquisa a ser concluída nesta área na Universidade Federal de Santa Catarina, o presente trabalho tem como **objetivo geral** investigar o uso da estereolitografia na fabricação direta de insertos de resina termofixa, utilizados para a produção de componentes injetados.

Adicionalmente, como **objetivos específicos**, têm-se:

- i) Realizar uma revisão bibliográfica sobre sistemas comerciais de processos de fabricação por camadas, visando:

- Apresentar uma descrição dos principais métodos existentes, expondo suas características e aplicações;
 - Apresentar uma forma sintética e organizada de classificação dos processos de ferramental rápido, assim como dos de fabricação por camadas;
 - Contribuir com uma nomenclatura em português para os principais termos e expressões referentes ao tema em questão.
- ii) Desenvolver estudos de caso de confecção de insertos de resina com uso do processo de estereolitografia, visando identificar possíveis limitações;
- iii) Estudar o emprego de uma liga de estanho como material de preenchimento da parte de trás dos insertos e compará-lo com o material indicado na literatura (liga à base de bismuto);
- iv) Investigar o uso cera para microfusão como material de injeção, em insertos de resina.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Organizou-se o desenvolvimento e a apresentação do trabalho em seis capítulos, além desta introdução. Cada uma destas seções tem aqui seus conteúdos sucintamente descritos:

- **Capítulo 2.** São apresentados os fundamentos da fabricação por adição de camadas, descrevendo-se os principais processos e sistemas disponíveis comercialmente, dando ênfase ao seu uso na fabricação de ferramental rápido;
- **Capítulo 3.** É realizada uma descrição detalhada das principais etapas do processo de fabricação de insertos de resina para moldes de injeção, através da estereolitografia, desde o primeiro passo (projeto e modelagem em CAD dos insertos) até a produção dos componentes injetados;

- **Capítulo 4.** Baseado nas orientações apresentadas no Capítulo 3, estudos de caso foram desenvolvidos. Este capítulo descreve o desenvolvimento desses estudos, assim como seus objetivos específicos, onde insertos fabricados diretamente por estereolitografia foram utilizados em ensaios práticos em máquinas injetoras, produzindo alguns tipos de peças em materiais distintos;
- **Capítulo 5.** Os resultados obtidos com a realização dos estudos de caso são apresentados e discutidos neste capítulo;
- **Capítulo 6.** Finalmente, mas não menos importante, são apresentadas algumas considerações sobre o processo uso da estereolitografia na fabricação direta de insertos, com base nos resultados obtidos. São também apresentadas sugestões para novas pesquisas e trabalhos relacionados ao tema em questão.

2.PROCESSOS COMERCIAIS DE FABRICAÇÃO POR CAMADAS

2.1.FUNDAMENTOS DA FABRICAÇÃO POR ADIÇÃO DE CAMADAS

Os processos de fabricação, utilizados para dar forma a um material, são normalmente baseados na remoção ou conservação de massa [17, 21, 44]. No primeiro grupo, o excesso de material é removido para produzir a forma desejada, seja por técnicas tradicionais (por exemplo: fresamento, torneamento e eletroerosão) ou não (corte a laser e usinagem de alta velocidade). Por outro lado, os de conservação partem de uma quantidade definida de material, que é deformada ou moldada para gerar a forma a ser alcançada. Neste contexto, os processos de conservação podem ser aplicados tanto para materiais no estado sólido (forjamento, estampagem, laminação, etc.) quanto no estado líquido (fundição e moldagem).

Nesses processos, nenhum material é adicionado, sendo apenas deformado ou removido. Contudo, surgiram novos métodos baseados na adição de material. Este é o princípio de funcionamento dos processos de fabricação por camadas, onde **finas camadas de material são sucessivamente adicionadas** (“empilhadas”) para produzir a forma desejada [1, 17, 21], como mostrado na Figura 1.

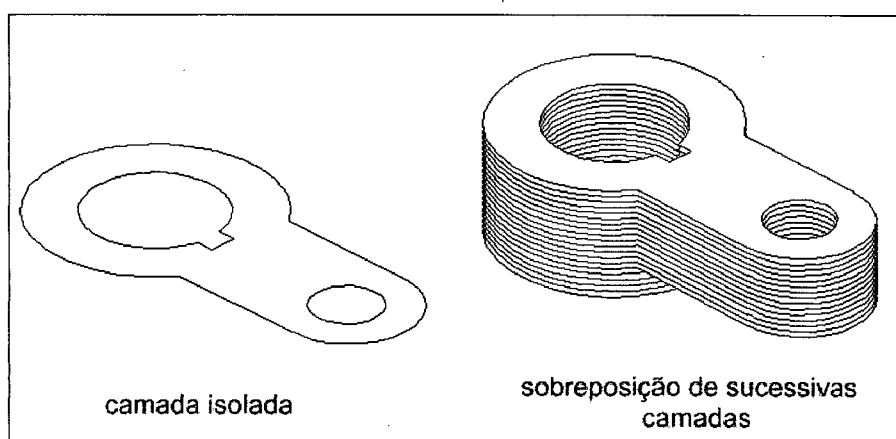


FIGURA 1 -Princípio da adição sucessiva de camadas [45]

Apesar de relativamente recente, diversos processos de fabricação por adição de camadas foram e ainda estão sendo desenvolvidos. Porém cada um possui suas próprias características, como, por exemplo, diferentes materiais que podem ser utilizados para a fabricação, bem como distintos princípios de adição de material. Atualmente, os princípios de adição empregados são [17, 18, 21]:

- **Cura seletiva (*selective curing*)**: um material líquido, normalmente um fotopolímero, é curado (solidificado) em posições específicas, camada após camada, para dar forma à peça desejada;
- **Sinterização seletiva (*selective sintering*)**: um material em forma de pó é sinterizado em posições específicas, camada após camada;
- **Deposição contínua (*continuous deposition*)**: através de um cabeçote de extrusão, um material é continuamente depositado para formar as diversas camadas da peça;
- **Deposição “gota a gota” (*drop-on-drop deposition*)**: semelhante ao princípio de funcionamento de uma impressora a jato de tinta, mas com movimento também na vertical, o material é depositado “gota a gota”, formando as várias camadas da peça;
- **Deposição “gota sobre o pó” (*drop-on-powder deposition*)**: um cabeçote de impressão tridimensional deposita, sucessivamente, gotas de aglutinante sobre finas camadas de material em pó, para construir a peça;
- **Laminação (*lamination*)**: folhas de material são sucessivamente posicionadas umas sobre as outras e unidas (coladas) através de prensagem ou por prensa ou por rolo aquecido de laminação.

Por se tratar de uma tecnologia que vem evoluindo rapidamente, não há um consenso com relação aos termos empregados para representá-la. Os mais comuns são: fabricação por

camadas (*layer manufacturing*), prototipagem rápida (*rapid prototyping*), manufatura rápida (*rapid manufacturing*), fabricação de formas livres (*solid freeform fabrication*), manufatura de mesa (*desktop manufacturing*) e impressão tridimensional (*tridimensional printing*).

O termo mais difundido atualmente é prototipagem rápida, que se consagrou inicialmente devido a primeira aplicação dessas novas tecnologias e processos ter sido a confecção rápida de protótipos. Contudo, este termo parece não ser o mais adequado, uma vez que as tecnologias para a fabricação rápida de objetos físicos, dependendo da aplicação, podem ser usadas para fabricar tanto um protótipo quanto uma peça, uma ferramenta ou mesmo um produto.

Neste trabalho, serão abordados os processos “aditivos” (princípio da adição sucessiva de finas camada de material) e para efeito de padronização será adotado o termo **fabricação por camadas** para representá-los.

2.2. CATEGORIAS DE PROTÓTIPOS

Um protótipo pode ser definido como “uma representação de uma ou mais características de um produto, no qual auxilia uma equipe de desenvolvimento à analisá-la(s) em relação aos requisitos do projeto” [21, 46]. Esta definição é ampla, englobando tanto “protótipos virtuais” [47] (por exemplo, um modelo eletrônico, em CAD) quanto “protótipos físicos”. Especialmente no que tange aos protótipos obtidos por fabricação por camadas (objetos físicos), uma definição mais específica é [1]:

- **Protótipos de visualização:** são aqueles utilizados para verificar a função estética do produto, fazer estudos de montagem, desenvolvimento de embalagens, ergonomia, viabilidade, análise de mercado, discussão entre grupos de estudo e revisão de projeto;

- **Protótipos de engenharia (ou funcionais):** utilizados na avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, químicas, ópticas e dimensionais, sendo geralmente submetidos às mesmas condições de uso do produto final, que será colocado no mercado. Neste caso, é importante que todas as características do protótipo sejam as mais próximas possíveis do produto final, como, por exemplo, mesmo material e escala 1:1.

2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA FABRICAÇÃO POR CAMADAS

(i) *Modelo em CAD*

O passo inicial para os processos de fabricação por camadas, em função de sua natureza de “manufatura integrada por computador” [17], é a modelagem eletrônica e tridimensional do objeto, em um sistema CAD. Uma vez concluído a modelagem, o objeto deve ser armazenado pelo sistema no formato de “arquivo STL”, que representa o objeto sólido através de uma malha de elementos triangulares [1, 21].

(ii) *Fatiamento eletrônico*

Uma vez que o modelo eletrônico foi gerado, o próximo passo é realizar o fatiamento eletrônico (*eletronic slicing*) do mesmo. Este passo é feito com o uso de um programa computacional desenvolvido especificamente para dividir o modelo em diversas seções transversais (camadas ou fatias) [1, 48, 49], como mostra esquematicamente a Figura 1.

(iii) *Flexibilidade geométrica*

O princípio da adição sucessiva de camadas de material permite que sejam fabricadas formas geométricas complexas, inclusive com detalhes internos, tão facilmente quanto formas

simples. Isto fornece aos processos de fabricação a flexibilidade de construir objetos físicos normalmente sem restrições quanto à forma geométrica.

(iv) *Efeito de “degraus de escada”*

Nos processos de fabricação por camada, a peça real é aproximada da “ideal”, modelada em CAD, por um determinado número de camadas. Quanto menor for a espessura de cada camada (espessura de fatiamento), melhor será a aproximação. Esta aproximação produz o efeito conhecido como “degraus de escada” (*stair-stepping effect*), ilustrado na Figura 2 [28, 48]. Este efeito é mais perceptível em superfícies inclinadas em relação à direção de fatiamento.

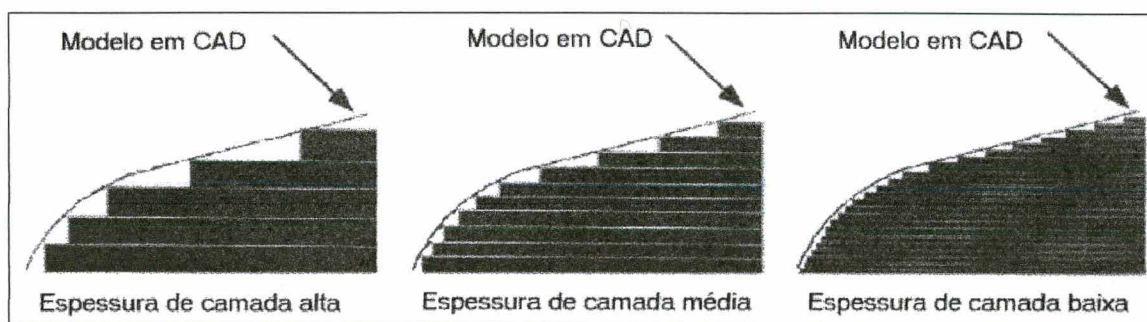


FIGURA 2 - Efeito de “degraus de escada” em função da espessura de camada [28]

(v) *Orientação espacial*

Os processos de fabricação por camada requerem que o modelo eletrônico do objeto a ser construído seja orientado espacialmente, para, por exemplo, diminuir o tempo de fabricação e/ou minimizar o efeito “degraus de escada” e assim reduzir a rugosidade superficial. Algumas recomendações para realizar a orientação são [50, 51, 52] :

- O objeto deve ser orientado dentro do volume de trabalho do equipamento. Caso suas dimensões ultrapassem, o modelo eletrônico pode ser seccionado, sendo o objeto fabricado em partes que precisam ser posteriormente montadas ou coladas;

- A orientação do objeto deve, preferencialmente, ser realizada de tal forma que sua maior dimensão não fique na mesma direção de fatiamento. Isto minimiza o número de camadas a serem construídas e, portanto, reduz o tempo de fabricação. Uma caneta, por exemplo, poderia ser fabricada horizontalmente ao invés de estar orientada verticalmente;
- Deve-se procurar minimizar o número de superfícies inclinadas em relação à direção de fatiamento, para assim reduzir o efeito “degraus de escada” (Figura 3);
- As faces do objeto que requerem uma melhor qualidade superficial, como aquelas que possuem furos ou outros detalhes, devem preferencialmente ficar orientadas em um plano horizontal, perpendicular à direção de fatiamento, pois é neste plano que normalmente os sistemas comerciais de fabricação por camadas possuem a maior resolução (Figura 3).

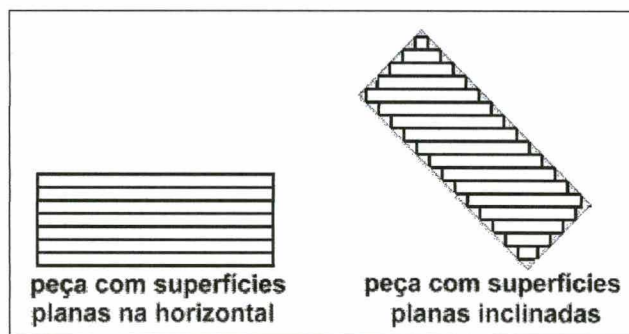


FIGURA 3 - Efeito de degraus de escada em superfícies inclinadas

2.4.DESCRICÃO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS COMERCIAIS DE FABRICAÇÃO POR CAMADAS

2.4.1. ESTEREOLITOGRAFIA (SL)

O objeto é construído sobre uma plataforma, que se movimenta verticalmente, dentro de um tanque preenchido com resina fotocurável (Figura 4), normalmente à base de epoxi ou

acrílico. Um feixe de laser ultravioleta, guiado por um conjunto de espelhos galvanométricos, é utilizado para solidificar as diversas seções transversais do objeto, no plano horizontal, pelo processo de fotopolimerização. Depois de formada a primeira camada sobre a plataforma, esta é deslocada para baixo, a um nível equivalente à espessura da camada subsequente. Isto permite que a resina líquida cubra a última camada recém solidificada. Uma lâmina de varredura (*recoater blade*) move-se através do reservatório, nivelando a camada líquida. Um tempo é reservado para que a superfície da resina se estabilize, antes do laser solidificar um nova camada. A operação se repete, camada após camada, até que se finalize a fabricação do objeto. Neste momento o elevador levanta a plataforma, retirando consigo o objeto sólido de dentro do reservatório e permitindo que a resina líquida seja drenada [1], através de orifícios existentes na plataforma móvel.

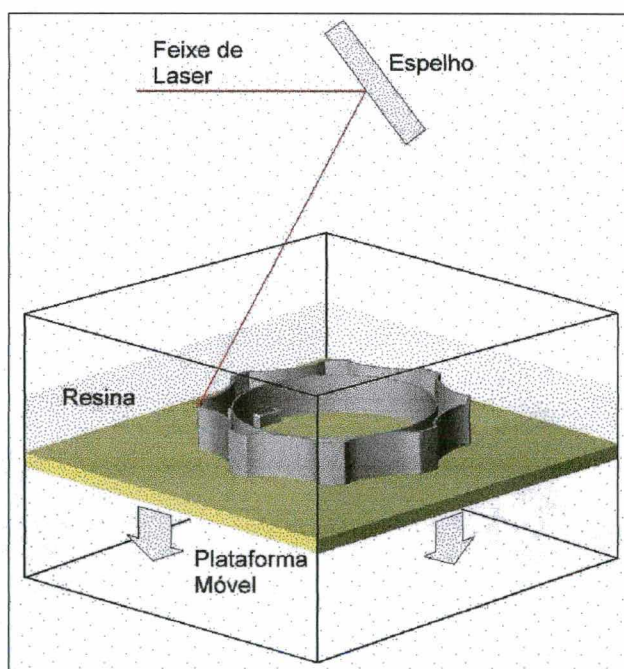


FIGURA 4 - Princípio de construção do processo de estereolitografia

A estereolitografia requer o uso de suportes para a fabricação do objeto. As principais razões são [50, 53]: separar facilmente o objeto da plataforma de construção, após a fabricação; ancorar o objeto firmemente à plataforma, evitando que flutue na resina líquida; suportar regiões do objeto que não possuem “suportes naturais” (*self-supporting*), como mostra a Figura 5; e reduzir distorções durante a etapa de construção. Os suportes são construídos pela própria máquina durante a fabricação do objeto.

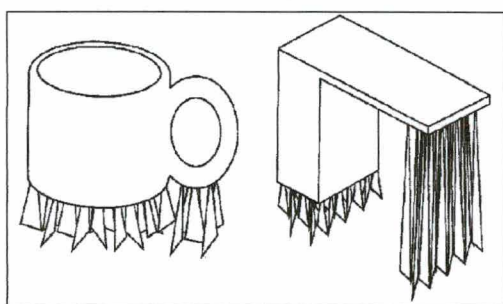


FIGURA 5 - Peças com suportes [50]

Completada a construção na máquina, o objeto requer uma etapa de pós-processamento. Isto envolve procedimentos de remoção dos suportes, limpeza, acabamento superficial (se necessário) e pós-cura [1, 50, 54, 55].

2.4.2. SINTERIZAÇÃO A LASER SELETIVO (SLS)

A construção do objeto pelo processo de sinterização a laser seletivo se inicia com a deposição de uma fina camada de material, na forma de pó, sobre a plataforma de construção, com o auxílio de um rolo de deposição (Figura 6). A primeira seção transversal do objeto é então “desenhada” (sinterizada) nessa camada de pó, por um feixe de laser de CO_2 , controlado computacionalmente através da movimentação de um conjunto de espelhos. A interação do feixe de laser com o pó eleva sua temperatura ao ponto de fusão, unindo as partículas e formando uma massa sólida. A energia do feixe de laser é modulada a ponto de fundir o pó somente nas áreas

definidas pela geometria do objeto naquela seção transversal específica. Em seguida, a plataforma desce o equivalente à espessura da próxima camada e o rolo deposita uma camada adicional de pó, sobre a previamente construída. O processo se repete sucessivamente, com cada camada fundindo-se a anterior, até que a construção seja completada. O objeto é então removido da câmara de construção (na máquina) e o pó que encontra-se ao redor de sua superfície externa é removido [20, 56]. O objeto pode ainda necessitar pós-processamento (jateamento de areia, polimento, pintura, etc.), em função da aplicação a que se destina. Os objetos fabricados por este processo costumam ter uma aparência porosa. Em alguns casos, especialmente em objetos metálicos, pode ser preciso fazer infiltração, com cobre ou epoxi, para reduzir sua porosidade [1, 28, 56, 57].

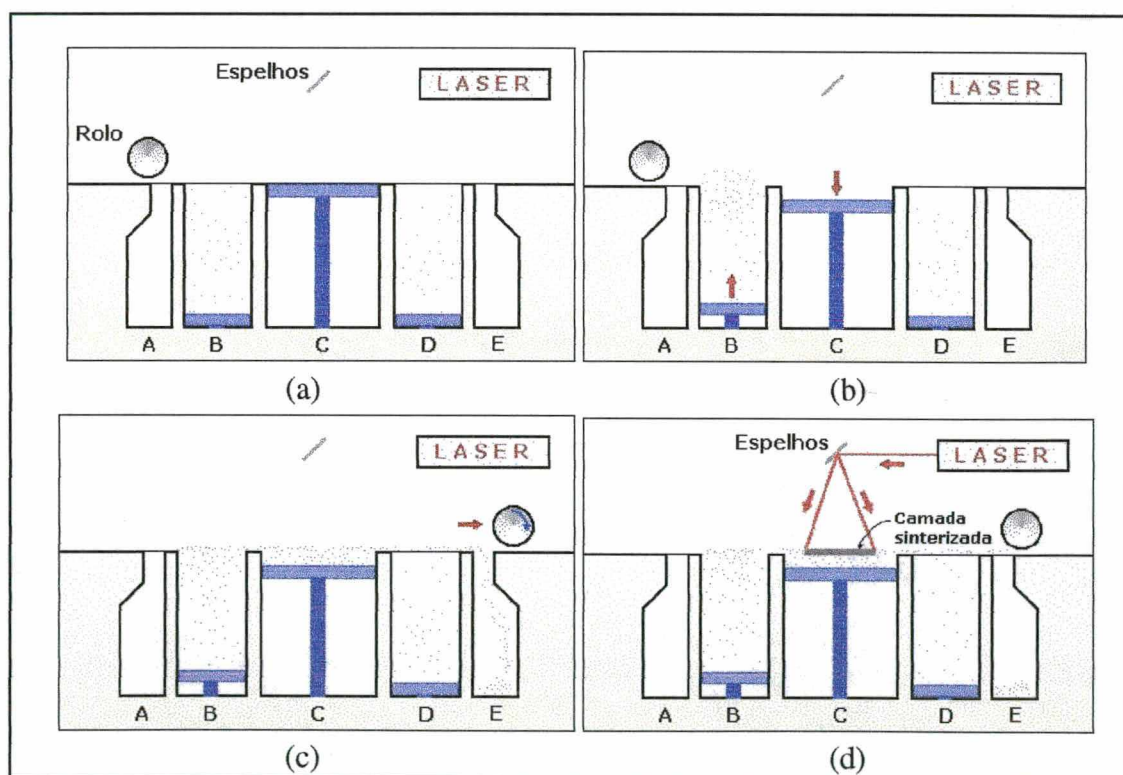


FIGURA 6 - Processo de sinterização a laser seletivo [58] – (a) Posição inicial da plataforma da construção; (b) Disponibilização de material em pó; (c) Deposição de uma camada de pó sobre a plataforma; (d) Sinterização da camada de pó

Existem atualmente dois fabricantes de sistemas SLS: a empresa DTM-Corp., que produz os equipamentos conhecidos por *Sinterstation*; e a EOS-Gmbh, com as máquinas *EOSInt* (ver Anexo B). No primeiro, as partículas de pó metálico são recobertas com um aglutinante polimérico. Devido a isso, a peça metálica, construída nesse equipamento, é retirada da máquina no estado ainda “verde”, necessitando de uma etapa posterior para remoção do aglutinante. Isto já não ocorre nos sistemas *EOSInt*, uma vez que, neste caso, o pó metálico não é recoberto com aglutinante.

2.4.3. FUSÃO E DEPOSIÇÃO DE MATERIAIS (FDM)

Este processo é baseado na extrusão de um filamento de material termoplástico. O objeto é construído sobre uma plataforma, que se movimenta na direção vertical. Um cabeçote de extrusão (Figura 7), com temperatura controlada, move-se no plano horizontal, depositando continuamente o filamento extrudado, sobre a plataforma, para formar as várias camadas da peça. Após a construção da camada inicial, a plataforma é deslocada para baixo, a uma altura equivalente a espessura da camada subsequente, e uma nova camada é depositada, solidificando-se junto a anterior. O processo se repete, camada após camada, até que a fabricação do objeto seja finalizada [1, 20].

Assim como na estereolitografia, o processo FDM também requer suportes para a fabricação. Os objetos fabricados por este processo costumam apresentar, principalmente em regiões próximas a furos ou bordas curvilíneas, um preenchimento incompleto de material, devido ao diâmetro do filamento extrudado ser superior aos detalhes a serem preenchidos. Após a fabricação e posterior remoção dos suportes, o objeto normalmente requer etapas de acabamento superficial, como polimento e pintura.

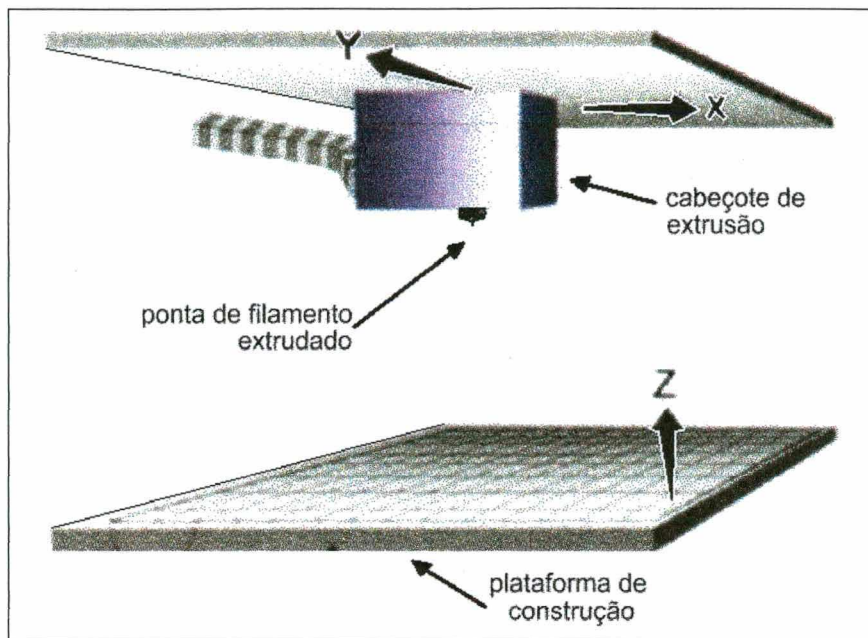


FIGURA 7 - Processo de fusão e deposição de materiais [59]

2.4.4. *SOLID GROUND CURING (SGC)*

Um diagrama esquemático deste processo é apresentado na Figura 8. Uma fina camada de resina fotocurável é exposta à radiação (proveniente de lâmpadas ultravioleta) que passa através de uma foto-máscara (*optical mask*), criada em uma placa de vidro, por um processo eletrostático, semelhante ao que ocorre nas fotocopiadoras. A resina é solidificada no formato descrito pela máscara, que permanece transparente nas regiões que representam a camada em construção. A resina não solidificada, que não faz parte do objeto, é coletada. Em seu lugar, cera é depositada, tendo a mesma função dos suportes construídos na estereolitografia. Através de fresamento subsequente, assegura-se a correta espessura de camada. O processo se repete, camada após camada. Ao final, a cera é removida e o objeto está pronto para, se for preciso, dependendo da aplicação, passar por etapas de acabamento superficial [20, 46, 60].

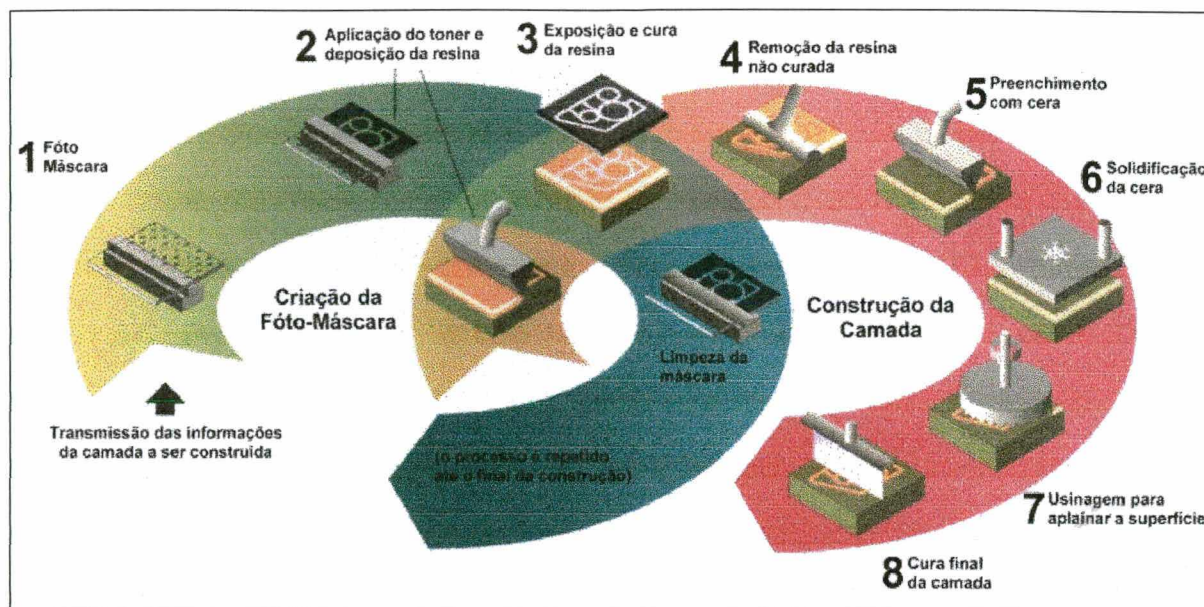


FIGURA 8 - Processo *Solid Ground Curing* [60]

2.4.5. LAMINAÇÃO DE OBJETOS PARA MODELOS (LOM)

O objeto é criado através da adesão sucessiva de folhas de papel, através de um rolo de laminação aquecido. Um laser de calor (CO_2), é usado para cortar o papel, na geometria descrita pelas bordas das diversas camadas da peça. No equipamento, o processo se inicia com uma camada de papel sendo posicionada sobre uma plataforma de construção. Após o corte do papel, pelo laser, na seção descrita pela primeira camada, uma nova folha de papel é automaticamente posicionada sobre a anterior e um rolo de laminação, aquecido, passa sobre elas. Como o papel utilizado é recoberto por uma película de cola, à base de material termoplástico, as folhas se unem ao passar do rolo. O processo se repete até que todas as camadas do objeto sejam completadas. As regiões do papel que estão próximas ao objeto em construção são também cortadas pelo laser. Ao final da construção, estas regiões são removidas manualmente e o objeto está pronto para, se for preciso, passar por etapas de acabamento superficial [1, 20, 28]. A Figura 9 ilustra o processo.

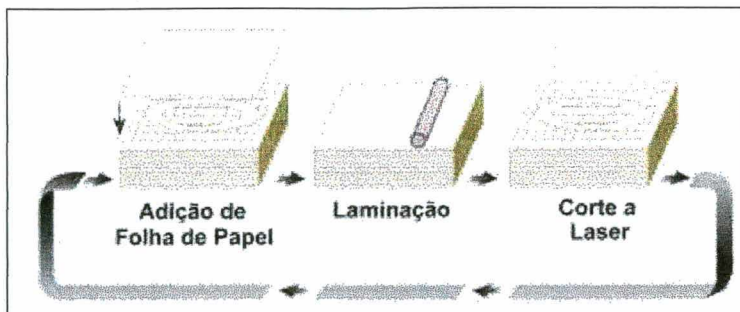


FIGURA 9 - Processo de laminação de objetos para modelos [61]

Neste processo, a espessura de camada é a própria espessura da folha de papel utilizada. Os objetos costumam ter uma aparência de madeira, com textura e densidade bastante semelhantes. Uma limitação do processo é a fabricação de objetos com regiões internas sem material como, por exemplo, orifícios ou regiões ocas, uma vez que não há como remover o papel que não faz parte do objeto, mas que permanece nessas regiões após a fabricação.

Apesar dos materiais disponíveis comercialmente serem a base de celulose (papel), existem pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de novos materiais para o processo LOM, dispostos em forma de folhas de, por exemplo, plástico, metal ou cerâmica [28, 62, 63].

2.4.6. TECNOLOGIA DE LAMINAÇÃO DE PAPEL (PLT)

É um processo semelhante ao LOM e que utiliza um papel especial. A construção acontece a medida que uma cola apropriada vai sendo aplicada sobre uma folha de papel, exatamente na mesma posição indicada pela seção transversal da camada em construção (Figura 10.a). Esta camada é colada a anterior, com auxílio de uma prensa aquecida (Figura 10.b). Um mecanismo automatizado de corte mecânico, por faca, denominado SAHP, corta o papel nas bordas da seção transversal do objeto (Figura 10.c). Em seguida, uma nova folha de papel é adicionada sobre a anterior, sendo então prensadas novamente. O processo se repete, camada após camada, até o final da construção, onde o objeto e o excesso de material formam um bloco sólido (Figura 10.d).

Através de procedimentos manuais, o excesso de material é removido (Figura 10.e), liberando o objeto (Figura 10.f) para etapas posteriores de acabamento, caso seja necessário. Em razão deste processo ser semelhante ao LOM, os objetos apresentam propriedades próximas.

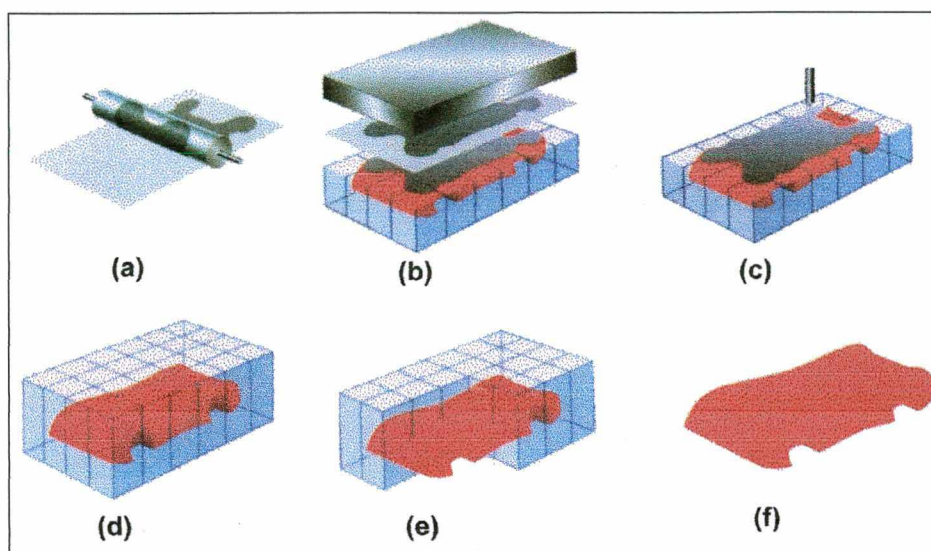


FIGURA 10 - Processo de tecnologia de laminação de papel [64]

2.4.7. SISTEMA JP5 (JPS)

Utiliza o mesmo princípio de funcionamento e basicamente os mesmos materiais dos processos LOM e PLT, atribuindo propriedades semelhantes aos objetos construídos com esta tecnologia. A diferença principal é que, neste processo, as folhas de papel são posicionadas manualmente sobre uma plataforma horizontal. Após o corte de cada camada, que é realizado por um sistema mecânico, com faca, a seção de papel é removida da plataforma, uma a uma, pelo operador, sendo devidamente armazenada. Ao fim do corte de todas as camadas (que irão formar o objeto), é necessário, manualmente, montar e colar umas sobre as outras.

2.4.8. IMPRESSÃO DE OBJETOS SÓLIDOS (SOP)

Neste processo, a primeira camada do objeto é construída sobre uma plataforma pela deposição, gota a gota, de um material específico, normalmente cera, através do uso de um cabeçote de impressão, semelhante aos existentes nas impressoras “jato de tinta” (Figura 11). A camada subsequente é depositada sobre a anterior e, sucessivamente, novas camadas vão sendo criadas, até o final da construção. Os suportes para a construção da peça são criados durante a própria fabricação, também por um mecanismo similar ao “jato de tinta”, mas num outro tipo de material, que é removido no final do processo, com uso de solventes apropriados, sem danificar o objeto.

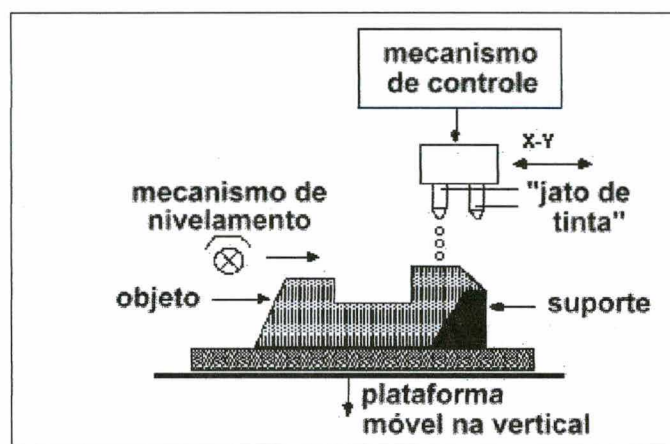


FIGURA 11 - Processo de impressão de objetos sólidos [65]

As superfícies inferiores dos objetos, fabricados por este processo, que ficam em contato com a plataforma de construção, costumam apresentar uma rugosidade superficial superior em relação às outras superfícies. No entanto, as outras superfícies apresentam boa qualidade e elevada reprodução de detalhes, o que permite o uso desse processo para a criação de modelos de cera para microfusão, inclusive com aplicações na indústria de jóias. Os principais fabricantes de equipamentos SOP são apresentados no Anexo B.

2.4.9. IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (3DP)

O processo de construção se inicia com uma fina camada de pó sendo depositada sobre uma plataforma que se movimenta na direção vertical. A primeira seção transversal do objeto a ser construído é desenhada nessa camada de pó, com um material aglutinante, normalmente cera, através de um cabeçote de impressão, também semelhante aos existentes nas impressoras jato de tinta. O processo se repete até que todas as camadas tenham sido construídas (Figura 12) [1, 20, 66, 67]. Finalmente, o material em pó, que encontra-se ao redor das superfícies externas da peça, é removido. A partir desse momento, se for preciso, a peça é submetida a etapas de sinterização do pó e de acabamento superficial.

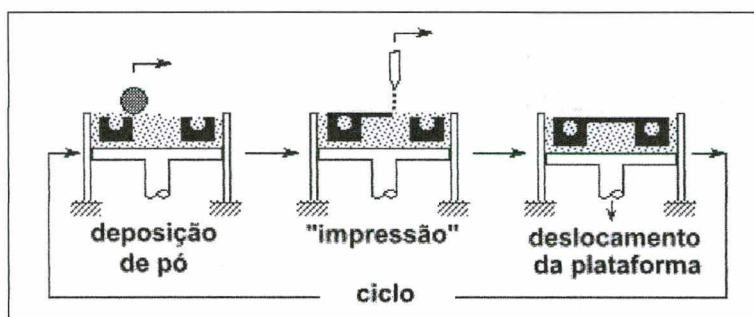


FIGURA 12 - Processo de impressão tridimensional [1]

Patenteado pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), o processo foi licenciado para duas empresas. Uma, a *Soligen*, aplica o princípio para a fabricação direta de cascas cerâmicas (DSPC – *Direct Shell Production Casting*), para o processo de microfusão. A outra (*Z Corporation*) está autorizada a só fabricar protótipos.

2.4.10. LASER ENGINEERED NET SHAPING (LENS)

Este processo utiliza um cabeçote, móvel na direção vertical, formado basicamente por um laser de Nd:YAG e um bocal de deposição de pó metálico, como mostra a Figura 13. O material

em pó é depositado, sobre uma plataforma móvel no plano horizontal, ao longo da seção descrita pela primeira camada do objeto em fabricação. A interação do feixe de laser com o pó sinteriza esta camada. O cabeçote é deslocado a uma altura equivalente a espessura da próxima camada e o processo se repete, camada após camada, até que todo o objeto tenha sido construído [68].

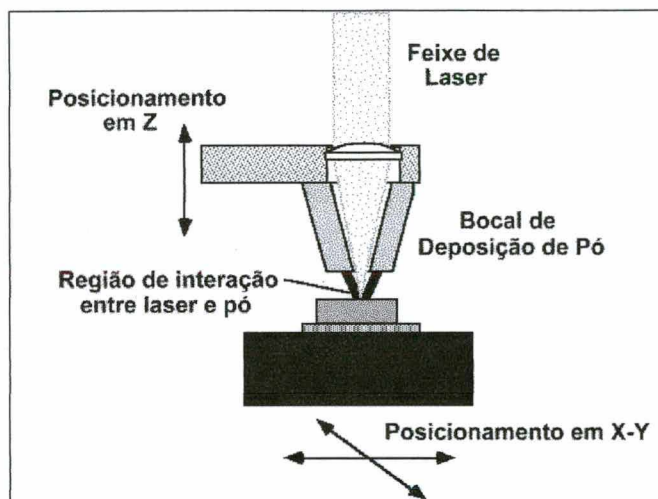


FIGURA 13 - Processo LENS [68]

2.4.11. FABRICAÇÃO TOPOGRÁFICA DE CASCAS (TSF)

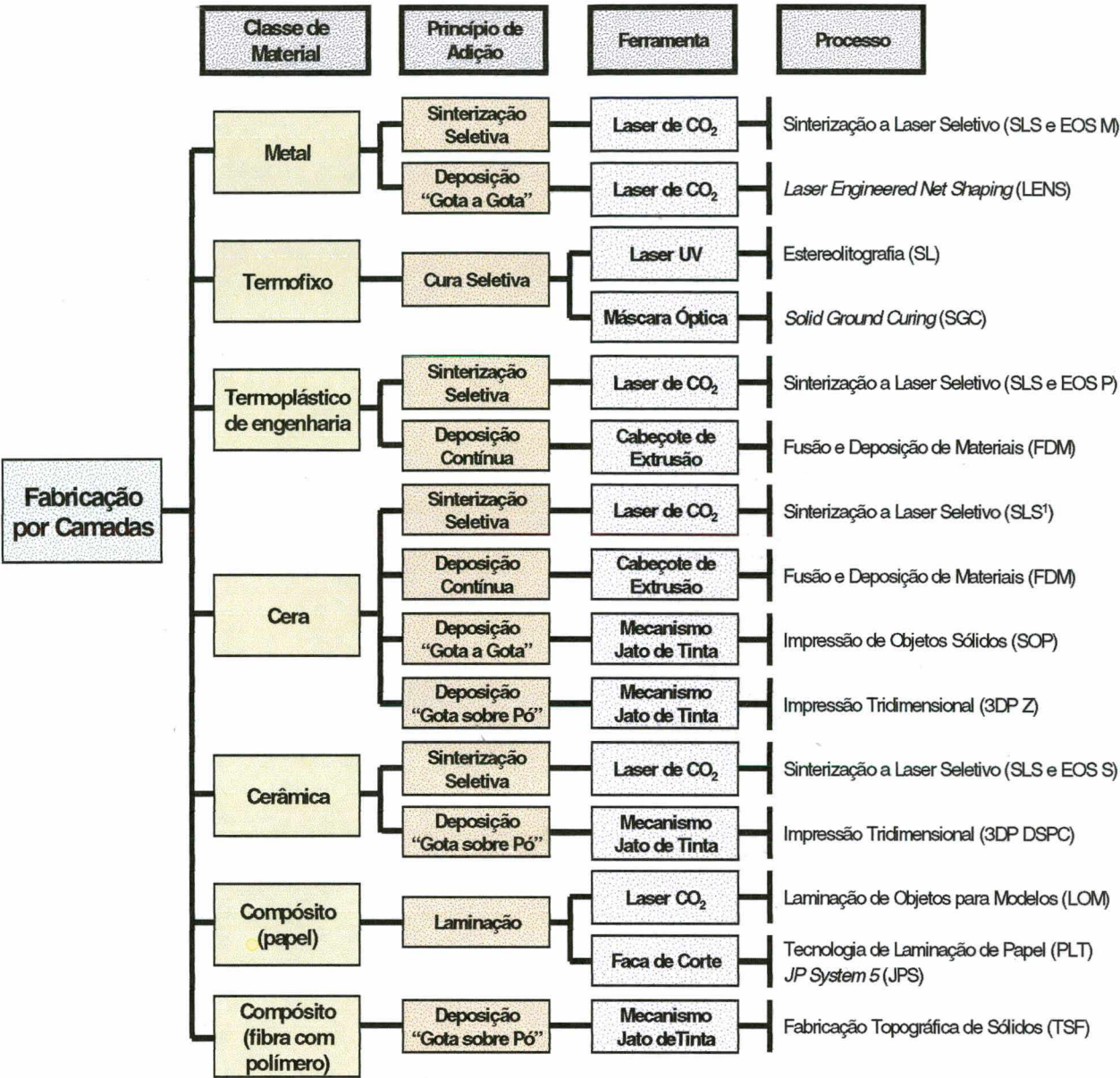
Neste processo, as diversas camadas do objeto são construídas, sucessivamente, pela deposição de um líquido, normalmente cera ou epoxi, sobre finas seções de material na forma de pó (ou em fibra), através do uso de um cabeçote/bocal que se movimenta nos eixos x , y e z . Sua principal diferença em relação ao processo de impressão tridimensional é que as camadas de material base (pó ou fibra) são adicionadas manualmente pelo operador. É um processo semi-automático e é destinado principalmente a construção de protótipos de grandes dimensões.

2.5. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR CAMADAS

Visando ter um melhor entendimento das possibilidades oferecidas por cada processo de fabricação por camada, é importante agrupá-los de acordo com uma dada classificação, em função, por exemplo, de:

- Estado inicial do material de fabricação (pó, líquido, etc.);
- Classe do material de fabricação (metal, cerâmica, polímero, etc.);
- Princípio de adição de material em que o processo se baseia (cura seletiva, deposição contínua, laminação, etc.);
- Tipo da ferramenta (laser, cabeçote de extrusão, etc.);
- Incerteza dimensional do processo ou do equipamento;
- Aplicação dos objetos (protótipo, peça, ferramenta, etc.);
- Dimensões máximas de peça que o processo/equipamento é capaz de fabricar.

Dentre as diversas alternativas citadas, a classificação proposta neste trabalho, apresentada na Figura 14, que baseou-se na classificação inicialmente proposta por [17], apresenta a vantagem de poder selecionar o processo de fabricação por camadas em função do tipo de material que será utilizado na construção. As principais características e aplicações dos processos de fabricação por camadas mais difundidos comercialmente são sumarizadas no Anexo B.



(1) Objeto construído em um material que apresenta propriedades semelhantes à cera para microfusão

FIGURA 14 - Classificação dos principais processos comerciais de fabricação por camadas

2.6.CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FERRAMENTAL RÁPIDO (RAPID TOOLING)

Existem basicamente duas maneiras para se fabricar, através dos processos de fabricação por camadas, uma ferramenta rápida, o que permite que seja definida a seguinte classificação [34, 35, 43]:

- **Direta**, quando o produto da fabricação por camadas, depois de algumas etapas de preparação, é a própria ferramenta; ou
- **Indireta**, quando o produto da fabricação por camadas é um modelo que será utilizado para a construção da ferramenta através de outro processo.

Uma outra possível forma de classificação está relacionada à resistência da ferramenta e, dessa forma, à sua vida [28, 31, 69]:

- **Ferramenta “mole”** (*soft tooling*): quando é capaz de produzir, em média, até 20 peças;
- **Ferramenta “de transição”** (*firm ou bridge tooling*): quando a produção situa-se na faixa de 20 a 1000 peças;
- **Ferramenta “dura”** (*hard tooling*¹): quando a produção é maior que 1000 peças.

Os processos de ferramental rápido podem também ser classificados de acordo com o processo de fabricação por camadas em que são baseados, como, por exemplo, processos baseados na estereolitografia.

O quadro a seguir (Figura 15) apresenta os principais processos de ferramental rápido, classificados, em primeira ordem, pelo processo de fabricação no qual a ferramenta rápida (que pode ser um inserto para um molde de injeção, um eletrodo para eletroerosão por penetração, uma casca cerâmica para microfusão, etc.) será utilizada. No próximo item deste trabalho, é realizada uma descrição desses processos.

¹ *Hard tooling* pode também ser associado às ferramentas de produção obtidas por métodos tradicionais, como fresamento e eletroerosão, normalmente construídas em aço ou alumínio.

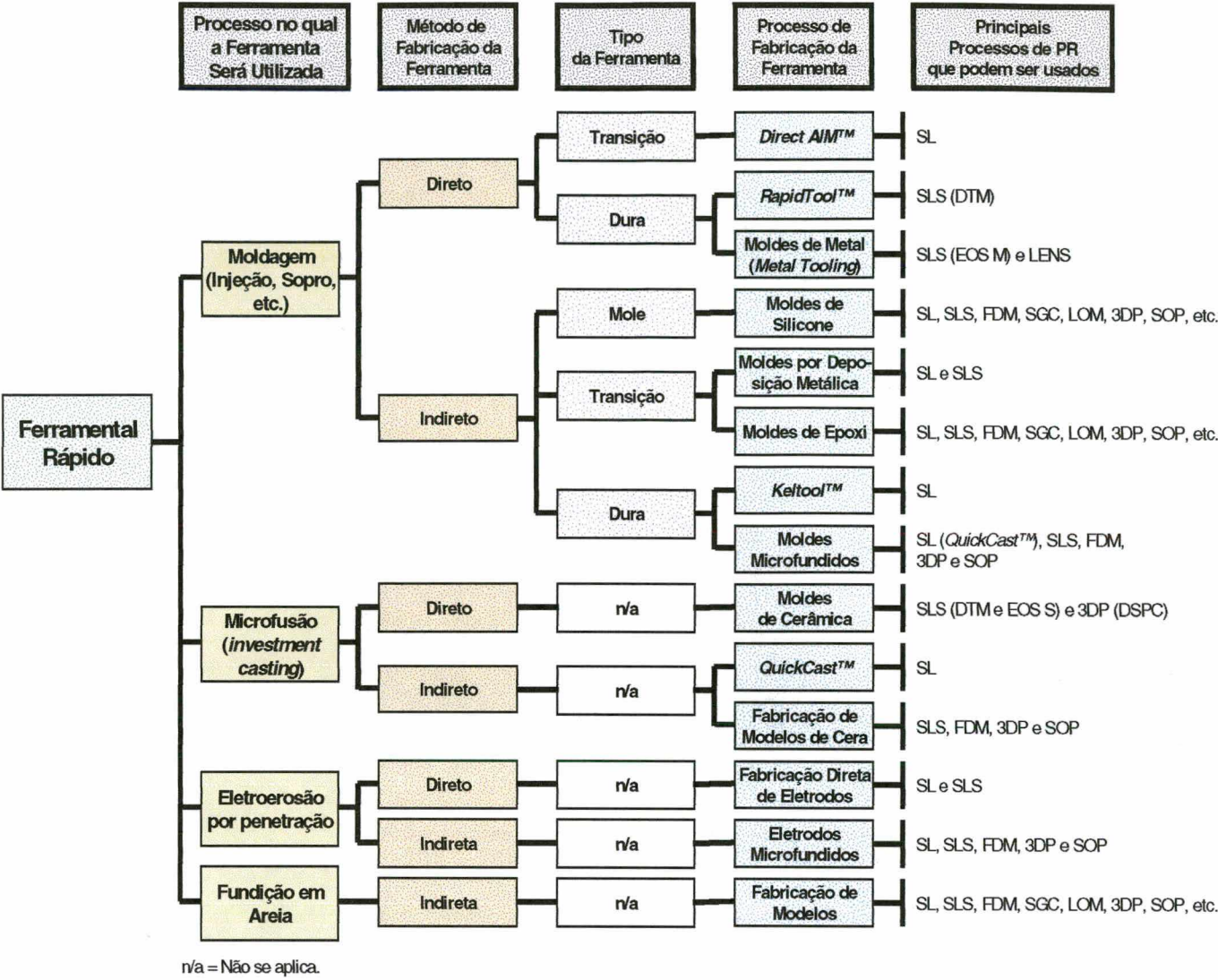


FIGURA 15 - Classificação dos processos para ferramental rápido

2.7.DESCRICÃO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DIRETOS DE FERRAMENTAL RÁPIDO

2.7.1.FABRICAÇÃO DIRETA DE INSERTOS DE RESINA ATRAVÉS DA ESTEREOLITOGRAFIA

Este processo foi desenvolvido pelo IPI², em conjunto com a empresa 3D Systems Inc. (Califórnia, EUA), tendo como aplicação a produção de pequenas séries de peças de plástico, por moldagem por injeção [38]. Este processo, que é conhecido comercialmente como *Direct AIM*, será abordado, com mais detalhes, no Capítulo 3 deste trabalho.

2.7.2.RAPIDTOOL

O processo *RapidTool*TM foi desenvolvido pela empresa DTM-Corp. (EUA), sendo utilizado para a fabricação de insertos metálicos, a serem utilizados na produção de peças de plástico injetadas. Baseia-se no processo de sinterização a laser seletivo, utilizando-se o material *RapidSteel*[®], que é formado por partículas de aço inoxidável recobertas com um aglutinante à base de polímero [31, 70, 71]. Este processo também pode ser utilizado para confecção de eletrodos, para eletroerosão por penetração.

O primeiro passo é o projeto e modelamento dos insertos em um sistema CAD tridimensional. Após a construção, pelo processo de sinterização a laser seletivo, os insertos são colocados num forno para a remoção do aglutinante e a completa sinterização da peça de aço. Devido à porosidade do inserto resultante, é preciso realizar uma etapa de infiltração, normalmente com cobre ou epoxi [31, 57, 72], com uma posterior etapa de acabamento superficial. Em seguida, os insertos são montados em um porta-moldes e, através da moldagem por injeção, peças de plástico podem ser produzidas. A Figura 16 apresenta a sequência de etapas envolvidas neste processo.



FIGURA 16 - Etapas do processo *RapidTool* [70]

2.7.3. FABRICAÇÃO DE MOLDES DE CERÂMICA PARA MICROFUSÃO

Alguns processos de fabricação por camadas, como a sinterização a laser seletivo (equipamentos *DTM-Sinterstation* e *EOS S*) e a impressão tridimensional (equipamentos *DSPC*), podem ser utilizados para a fabricação direta de cascas cerâmicas, a serem utilizadas como moldes para a fundição de metais, através do processo de microfusão [67]. A partir do modelamento da casca cerâmica, em CAD tridimensional, no formato negativo da peça metálica a ser produzida, ela é construída por fabricação por camadas, sem a necessidade de um modelo de sacrifício, tradicionalmente necessário na microfusão.

² *Institute for Plastic Innovation, University of Massachusetts at Lowell*

2.7.4. FABRICAÇÃO DE MOLDES DE METAL (*METAL TOOLING*)

Insertos metálicos para a produção de componentes de plástico injetados, em grandes quantidades, podem ser fabricados diretamente através de alguns processos de fabricação por camadas, como a sinterização a laser seletivo, da empresa EOS-Gmbh (Alemanha), com uso de equipamentos EOS M, de forma análoga ao processo *RapidTool* da DTM-Corp (EUA). A principal diferença é o material utilizado. No EOS M, as partículas de aço, que são utilizadas para a confecção do inserto, não são recobertas com um material aglutinante, como ocorre no *RapidTool*.

2.7.5. FABRICAÇÃO DE ELETRODOS PARA ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO

A eletroerosão é um processo normalmente utilizado para a fabricação de cavidades de moldes para a injeção de termoplásticos. Qualquer material que apresente uma boa condutividade elétrica pode, a princípio, ser usado para a fabricação de um eletrodo para eletroerosão. Na prática, são usados os materiais que podem ser facilmente usinados, possuem baixa taxa de desgaste ao cisalhamento durante a eletroerosão e combinam baixa resistividade e boa condutividade térmica [73]. Os eletrodos são fabricados tradicionalmente pelos métodos convencionais de usinagem, em cobre ou grafite.

A possibilidade de reduzir o tempo de fabricação de eletrodos, utilizando a fabricação por camadas, tem sido estudada [73, 74]. O processo normalmente consiste em construir um modelo, por fabricação por camadas, na forma do eletrodo, mas com dimensões um pouco inferiores. Este modelo, após ser recoberto com um material condutor de eletricidade, pode, a princípio, ser usado como um eletrodo. Contudo, existem processos de fabricação por camadas que podem construir um eletrodo sem que seja necessário uma etapa posterior de deposição de material

condutor, como o processo de sinterização a laser seletivo (com o uso de materiais como cobre ou aço).

Para isso, vários métodos disponíveis para a deposição de material sobre um substrato tem sido investigados [73, 74, 75]. A pulverização metálica de cobre e zinco sobre modelos de estereolitografia foi explorada, mas apresentou pouco sucesso [73]. Deformações podem ocorrer tanto no recobrimento de cobre (ou zinco) quanto no modelo de estereolitografia. É difícil conseguir uma boa aderência do material depositado no modelo, sem que este quebre ou deforme. Outra limitação é que a taxa de desgaste do eletrodo, na eletroerosão, é bastante alta.

Um método que tem mostrado um bom potencial é a metalização de modelos de estereolitografia através de galvanização ou por técnicas de deposição a vapor com subsequente galvanização. Problemas normalmente encontrados são: depositar uma quantidade uniforme e suficiente de material, sem alterar de forma significativa as tolerâncias do modelo; e manter uma boa “aderência” entre o material do depositado e o modelo.

Um outro método é aplicar inicialmente uma camada de tinta condutora, da ordem de 10 μ m de espessura, sobre os modelos de estereolitografia. Posteriormente, são recobertos, por galvanização, com cobre e zinco, com uma espessura de aproximadamente 180 μ m. Esta técnica tem mostrado que o metal se “adere” bem ao modelo, mas pode ser problemático controlar uma distribuição uniforme de material depositado [73].

2.8.DESCRICÃO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS INDIRETOS DE FERRAMENTAL RÁPIDO

2.8.1.MODELOS DE ESTEREOLITOGRAFIA PARA MICROFUSÃO (*QUICKCAST*)

Este processo foi desenvolvido pela empresa 3D Systems Inc., que detém a patente da estereolitografia, e destina-se principalmente à produção de protótipos metálicos funcionais [10,

28, 69, 76], através do processo de microfusão, obtidos a partir de modelos de sacrifício, construídos por estereolitografia, em resinas à base de epoxi, ao invés de serem fabricados tradicionalmente em cera, por moldagem por injeção.

Assim, não há necessidade de um molde para a injeção dos modelos de sacrifício, em cera. Os modelos podem agora ser construídos diretamente por estereolitografia, num estilo de construção em que sua estrutura interna, em forma de colméia, possui cerca de 70% de seu volume preenchido por ar [12, 69].

O modelo é montado em uma árvore de microfusão, em cera, e então recoberto com sucessivos banhos de cerâmica, formando uma casca rígida ao seu redor. Posteriormente, é colocado em um forno, para a sinterização da casca cerâmica. Nesta etapa, o modelo de estereolitografia, devido ao aumento da temperatura, tende a se expandir, mas, como possui uma estrutura interna em forma de colméia e está recoberto por uma casca rígida de cerâmica, suas paredes se colapsam. Ainda no forno, com a maior elevação da temperatura, tanto o modelo quanto a árvore de cera queimam-se, deixando livre o espaço que ocupavam no interior da casca cerâmica, que funciona como um molde. O metal fundido é então vazado para dentro desta casca. Após a solidificação do metal, a casca cerâmica é quebrada e a peça metálica produzida é retirada [77]. Se for preciso, a peça passará por etapas posteriores de acabamento, como jateamento de areia e polimento.

Neste processo, cada modelo de estereolitografia dá origem a uma única peça metálica. Existem pesquisas para investigar o uso de insertos metálicos, para moldes de injeção de plástico, produzidos através do processo *QuickCast* [78, 79]. Assim como avaliar a possibilidade de fabricar eletrodos para eletroerosão por penetração [78].

2.8.2. *KELTOOL*

Desenvolvido inicialmente pela empresa Keltool Inc. (EUA), teve seus direitos de comercialização comprados pela 3D Systems Inc. O processo baseia-se na fabricação de insertos de aço, através de sinterização, para a produção, em grande escala, de peças de plástico, obtidas por moldagem por injeção [12, 28, 41, 80].

Os insertos podem ser fabricados por dois caminhos diferentes (Figura 17). Na “geração direta”, um modelo negativo da peça, já na forma do inserto, é fabricado através da estereolitografia. A partir deste modelo, é criado um positivo, em silicone (ver descrição sobre moldes de silicone no próximo item), que é posicionado no interior de uma caixa apropriada, sendo esta preenchida com uma mistura de pó metálico e aglutinante. Depois da cura do aglutinante, obtêm-se a chamada “peça verde”, já na forma do inserto. Colocada em um forno, o aglutinante é eliminando e a peça sinterizada. Na “geração reversa”, o processo inicia-se com a fabricação, pela estereolitografia, de um modelo positivo da peça. Este modelo é colocado numa caixa de moldagem, para a produção de um negativo na peça, em silicone, já na forma do inserto. A partir deste negativo, é criado um modelo positivo, também em silicone. Deste ponto em diante, o positivo em silicone segue a mesma sequência da “geração direta”, até a obtenção do inserto, em aço, sinterizado.

Em ambos os caminhos, o inserto produzido possui uma aparência porosa, precisando passar por uma etapa de infiltração, com cobre. Após esta etapa e outras para dar acabamento superficial, os insertos podem ser montados em um porta-moldes, para a produção das peças injetadas. Apesar da “geração reversa” possuir passos adicionais, ela pode apresentar consideráveis simplificações relacionadas ao acabamento superficial dos insertos. O processo *Keltool* pode também ser utilizado para a fabricação de eletrodos, para eletroerosão por penetração [41, 80].

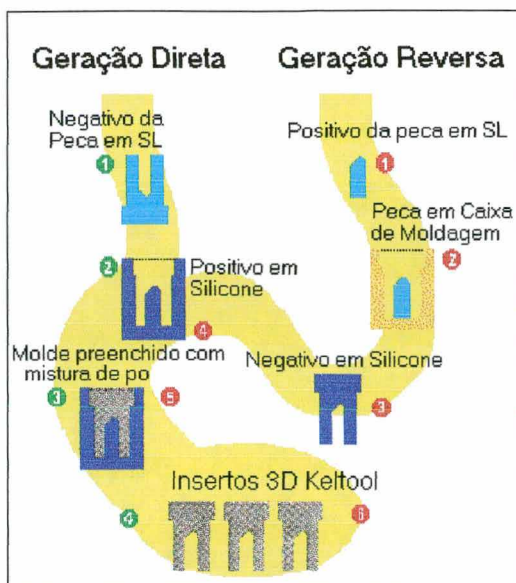


FIGURA 17 - Passos para a obtenção do inserto pelo processo *Keltool* [80]

2.8.3. FABRICAÇÃO DE MOLDES POR DEPOSIÇÃO METÁLICA (*METAL DEPOSITION TOOLING* OU *SPRAY METAL TOOLING*)

O processo envolve um modelo, construído por fabricação por camadas, da peça a ser produzida, para a fabricação indireta de um inserto para moldes de injeção [12, 28, 41]. O modelo, que incorpora ângulos de saída, sistema de alimentação (canal de alimentação e ponto de injeção) e bom acabamento superficial, é posicionado e fixado em uma base emoldurada, estabelecendo a linha de abertura do molde [28]. Uma fina camada metálica, de aproximadamente dois a três milímetros, é depositada sobre o modelo e a base. Existem basicamente três técnicas de deposição que podem ser utilizadas.

A pulverização metálica, a gás (*gas metal spraying*) ou a arco elétrico (*arc metal spraying*), é mais utilizada [31]. O primeiro método envolve uma liga de baixo ponto de fusão, normalmente à base de chumbo e estanho, que passa através de uma pistola de ar comprimido, similar às pistolas de pintura. O segundo utiliza uma pistola na qual um arco elétrico entre dois

fios provocam a sua fundição. O material fundido (alumínio ou zinco) é então pulverizado por ar comprimido.

Na segunda técnica de deposição, por galvanização, o modelo é inicialmente pulverizado com uma tinta condutora de eletricidade e, em seguida, é colocado num “banho ácido” contendo partículas de níquel. Uma tensão elétrica é aplicada ao “banho” e o níquel é atraído para a tinta condutora por eletrólise.

A última técnica é por deposição de níquel a vapor, onde o modelo é aquecido a temperaturas de 110 a 190 °C, normalmente, e gás de $\text{Ni}(\text{CO})_4$ é aspergido sobre ele. Conseqüentemente, uma camada de níquel é depositada sobre o modelo.

Uma vez que uma casca metálica foi criada sobre o modelo, tubos de cobre (para refrigeração) são posicionados e a casca metálica é preenchida, na parte de trás, com o uso de, normalmente, uma mistura de resina epoxi e partículas de alumínio, para dar resistência ao molde. O processo é repetido para a outra face. Após a abertura da base emoldurada, o modelo é retirado e casca metálica, preenchida na parte de trás, torna-se o inserto para o molde, classificado como uma “ferramenta de transição” (*bridge tooling*), mas que pode ser utilizado para a produção de até milhares de peças. A Figura 18 apresenta os principais passos envolvidos na fabricação de um molde por pulverização metálica.

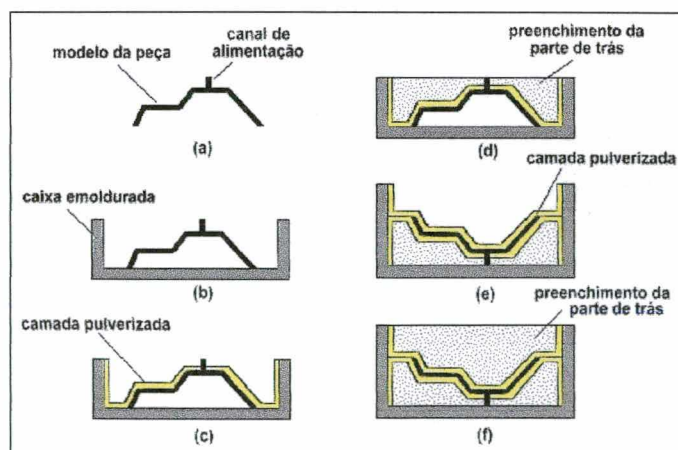


FIGURA 18 - Etapas para a fabricação de um molde por pulverização metálica

A maior limitação da pulverização metálica é que não é apropriada para peças que possuem características como projeções, que impedem ou obstruem a passagem e deposição uniforme do metal pulverizado. Por esta razão, este processo é restrito à peças com superfícies grandes e ligeiramente curvas [31].

Este processo produz insertos viáveis economicamente, com boa reprodução dimensional das características da peça, mas apresentam baixas propriedades mecânicas e térmicas, quando são comparados aos de aço.

Dos materiais normalmente utilizados para pulverização, o níquel é o que apresenta as melhores propriedades, mas a taxa de sua deposição, por galvanização, é lenta (cerca de 10 μm por hora) e a espessura da camada depositada depende das características geométricas da superfície. Regiões com cantos vivos, por exemplo, são difíceis de serem preenchidas por galvanização. A deposição de níquel a vapor não apresenta essas limitações, contudo requer que o modelo tenha capacidade de suportar temperaturas acima de 110°C [81].

2.8.4. FABRICAÇÃO DE MOLDES DE SILICONE (*SILICONE RUBBER TOOLING*)

Através do uso de moldes de silicone, também conhecidos como *RTV Tools (Room Temperature Vulcanizing)*, é possível moldar pequenas quantidades de peças [28], normalmente em material à base de poliuretano, com excelente reprodução de superfícies e detalhes [12, 41]. Existe uma grande variedade de tipos de poliuretano, disponíveis comercialmente, com propriedades mecânicas bastante diversificadas, podendo apresentar comportamentos semelhantes a, por exemplo, elastômero, náilon, acrílico, polipropileno, etc [28, 82].

O primeiro passo para a fabricação de um molde de silicone é a construção de um modelo da peça a ser moldada, que, a princípio, pode ser fabricada por qualquer processo de fabricação. No entanto, esse tipo de molde passou a ser mais utilizado após o surgimento da fabricação por

camadas que, devido à facilidade e versatilidade de construir rapidamente o primeiro modelo físico da peça.

A Figura 19 apresenta os principais passos para a fabricação do molde de silicone e para a produção das peças de poliuretano. Após a fabricação do modelo, com o sistema de canais de alimentação já incorporados, ele é posicionado e fixado no interior de uma caixa moldagem. Esta caixa é preenchida com silicone, que envolve todo o modelo. O silicone é misturado e desgaseificado. Após sua cura (vulcanização), o conjunto é retirado da caixa de moldagem. O molde é então cortado manualmente, com uso de estilete ou bisturi, ao longo da linha de partição, e o modelo é retirado. O molde é fechado e novamente colocado na caixa de moldagem. Em seguida, é preparada a mistura de poliuretano líquido com um endurecedor, que é então vazada para o interior do molde, por gravidade, com ou sem auxílio de vácuo. No caso do uso de vácuo para auxiliar o preenchimento da cavidade, o processo é conhecido como *vacuum casting*. Após a cura do material, abre-se o molde de silicone e retira-se a peça.

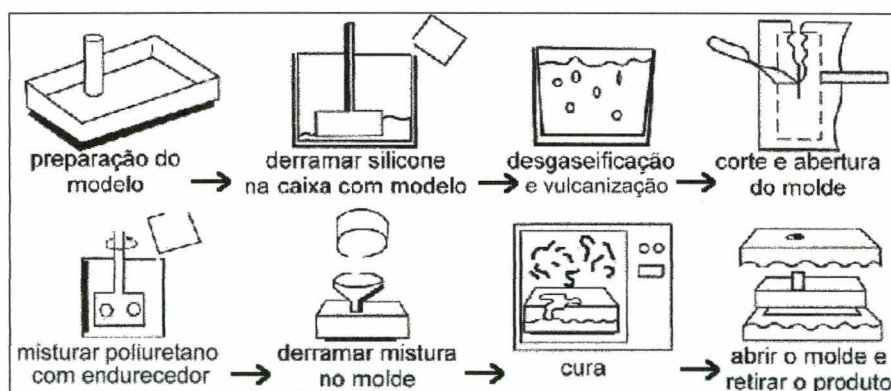


FIGURA 19 - Etapas para a fabricação de peças com uso de moldes de silicone

2.8.5. FABRICAÇÃO DE MOLDES DE EPOXI (CAST-EPOXY TOOLING)

Com o uso de moldes de resina epoxi, é possível obter pequenas séries de peças de termoplásticos, normalmente obtidas por moldagem por injeção [31]. O processo para a

fabricação de moldes de resina é semelhante ao utilizado para os moldes de silicone (Figura 20), contudo, é utilizado um composto à base de epoxi ao invés do silicone.

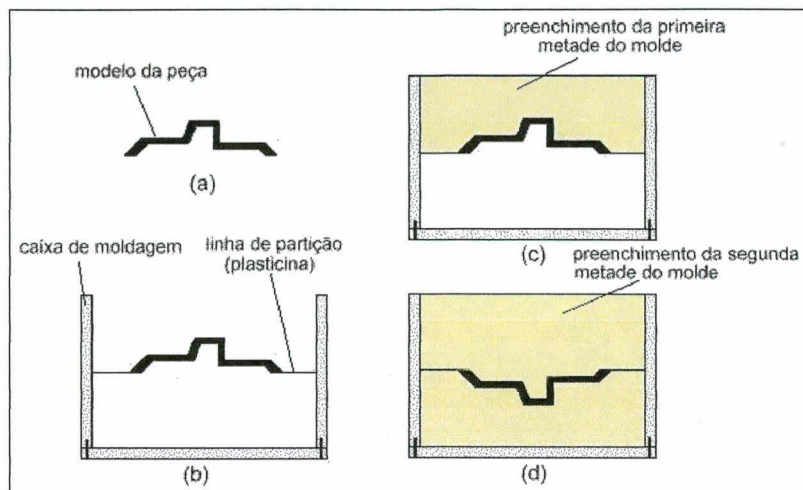


FIGURA 20 - Principais passos para a fabricação de um molde de epoxi

A fabricação do molde inicia-se a partir de um modelo da peça, obtido por fabricação por camadas ou por algum outro processo, que é posicionado e fixado em uma caixa de moldagem. A linha de partição do molde é definida neste ponto, com o uso de um material apropriado, normalmente plasticina (*plasticine*) [31]. Canais de alimentação e ponto de injeção podem ser incorporados neste passo ou usinados posteriormente. O modelo é recoberto com desmoldante e a primeira metade do molde é preenchida com resina à base de epoxi. Partículas de alumínio podem ser misturadas ao epoxi para auxiliar na refrigeração do molde. Neste caso, o processo é conhecido por *Composite Tooling* (ferramenta de material compósito). Também para favorecer a remoção de calor, tubos de cobre podem ser posicionados, dentro da caixa de moldagem, antes do preenchimento com a resina. Após a cura do epoxi, a caixa de moldagem é invertida, para realizar o preenchimento da segunda metade do molde. Após a cura, o molde é aberto e o modelo é retirado [83].

Uma limitação é que a cura do epoxi é uma reação exotérmica e, com isso, nem sempre é possível “moldar” o epoxi, diretamente sobre o modelo construído por fabricação por camadas, sem danificá-lo. Neste caso, um molde de silicone pode ser utilizado para a produção dos modelos, em materiais mais resistentes.

2.8.6. MODELOS DE CERA PARA MICROFUSÃO

O processo de microfusão é bastante utilizado, em conjunto com a fabricação por camadas, para a produção de protótipos funcionais de metal [9, 81, 84]. Um dos processos de ferramental rápidos, desenvolvido para esta finalidade, foi o *QuickCast*, que tem como base um modelo de estereolitografia, em resina epoxi, conforme já citado.

Contudo, a estereolitografia não é o único processo de fabricação por camadas que pode ser utilizado. Existem outros que produzem, diretamente em cera, os modelos de sacrifício a serem usados na microfusão. Os principais são: sinterização a laser seletivo, fusão e deposição de materiais, impressão tridimensional e impressão de objetos sólidos (Figura 14).

De forma análoga, os modelos em cera são recobertos com uma casca cerâmica. A cera é removida, pelo mesmo método utilizado no processo tradicional de microfusão. Em seguida, a casca cerâmica é sinterizada no forno. O metal fundido é vazado para dentro desta casca, dando origem a peça metálica.

Quando é necessário um número maior de peças ou protótipos, isto pode ser economicamente desfavorável, pois cada modelo produzido por fabricação por camadas dá origem a uma única peça de metal. Uma alternativa é utilizar outro tipo de ferramenta rápida, para a produção de uma pequena série de peças, em cera para microfusão, como, por exemplo, moldes de silicone [84].

Uma outra possibilidade, ao invés de cera, é utilizar água (gelo) [85]. A partir de um modelo obtido por fabricação por camadas, o molde de silicone é criado. Água (com alguns aditivos para minimizar as bolhas de ar) é vazada para o interior do molde, sendo este conjunto colocado num congelador. O resultado é um padrão de gelo, que é mergulhado numa solução refrigerada de álcool etílico e areia, para criar a casca cerâmica da microfusão.

2.8.7. FABRICAÇÃO DE MOLDES POR MICROFUSÃO

A partir de modelos de sacrifício obtidos por fabricação por camadas, em cera ou em resina à base de epoxi (estereolitografia), conforme citado anteriormente, peças metálicas podem ser obtidas, através do processo de microfusão. Essas peças podem ser, por exemplo, um inserto para um molde de injeção. O objetivo principal é alcançar a forma mais próxima do inserto obtido pelo método tradicional (por usinagem), visando, por exemplo, reduzir tempo em operações de desbaste. No entanto, para certas aplicações, pode ser necessário apenas realizar o acabamento superficial do inserto microfundido[28, 78].

2.8.8. MODELOS PARA FUNDIÇÃO EM AREIA

O processo de fundição em areia necessita de um modelo, normalmente em madeira ou gesso, da peça a ser fabricada. Esses modelos, que funcionam como a “ferramenta” da fundição, podem ser construídos rapidamente por meio de praticamente todos os processos de fabricação por camadas. Os mais utilizados para esta finalidade específica são os construídos em papel, pelos processos LOM, PLT e JPS [28].

3.FABRICAÇÃO DIRETA DE INSERTOS DE RESINA COM USO DA ESTEREOLITOGRAFIA

3.1.DEFINIÇÃO

Este processo possui a denominação *Direct AIM (ACES Injection Molding)*, em função de fabricar insertos para moldagem por injeção, diretamente com o uso do estilo de construção *ACES* da estereolitografia (*Accurate Clear Epoxy Solid*, ver item 3.5.5) [86, 87]. Permite a produção de protótipos ou pequenas séries de peças injetadas, em uma variedade de materiais termoplásticos.

Seu desenvolvimento teve início em 1995, no *Institute for Plastic Innovation (University of Massachusetts at Lowell)*, em conjunto com a empresa 3D Systems Inc. (Valência, Califórnia, EUA), detentora da patente da estereolitografia. Porém foi em meados de 1996 que foi apresentado de forma comercial.

3.2.PRINCIPAIS ETAPAS

O primeiro passo é o projeto e modelamento, em CAD tridimensional, dos insertos do molde, em forma de casca. Isto envolve a adição, por exemplo, do sistema de canais de alimentação e de extração. Em seguida, os insertos são fabricados por estereolitografia, em resina à base de epoxi, e posteriormente montados nas respectivas placas porta-cavidades do porta-moldes, previamente preparadas. O sistema de refrigeração (por exemplo, tubos de cobre) é posicionado, na parte de trás do inserto. Em seguida, essa parte de trás é preenchida com um material apropriado, visando aumentar a resistência do inserto, que foi construído em forma de casca. O material de preenchimento é também importante para auxiliar na troca de calor durante o processo de moldagem por injeção. Após a uniformização e nivelamento, por usinagem, da

superfície preenchida, a montagem dos outros componentes do molde é completada. O molde é então montado em uma máquina injetora que, depois de ajustada, possibilita a injeção das peças. A Figura 21 apresenta, de forma esquemática, as principais etapas do processo.

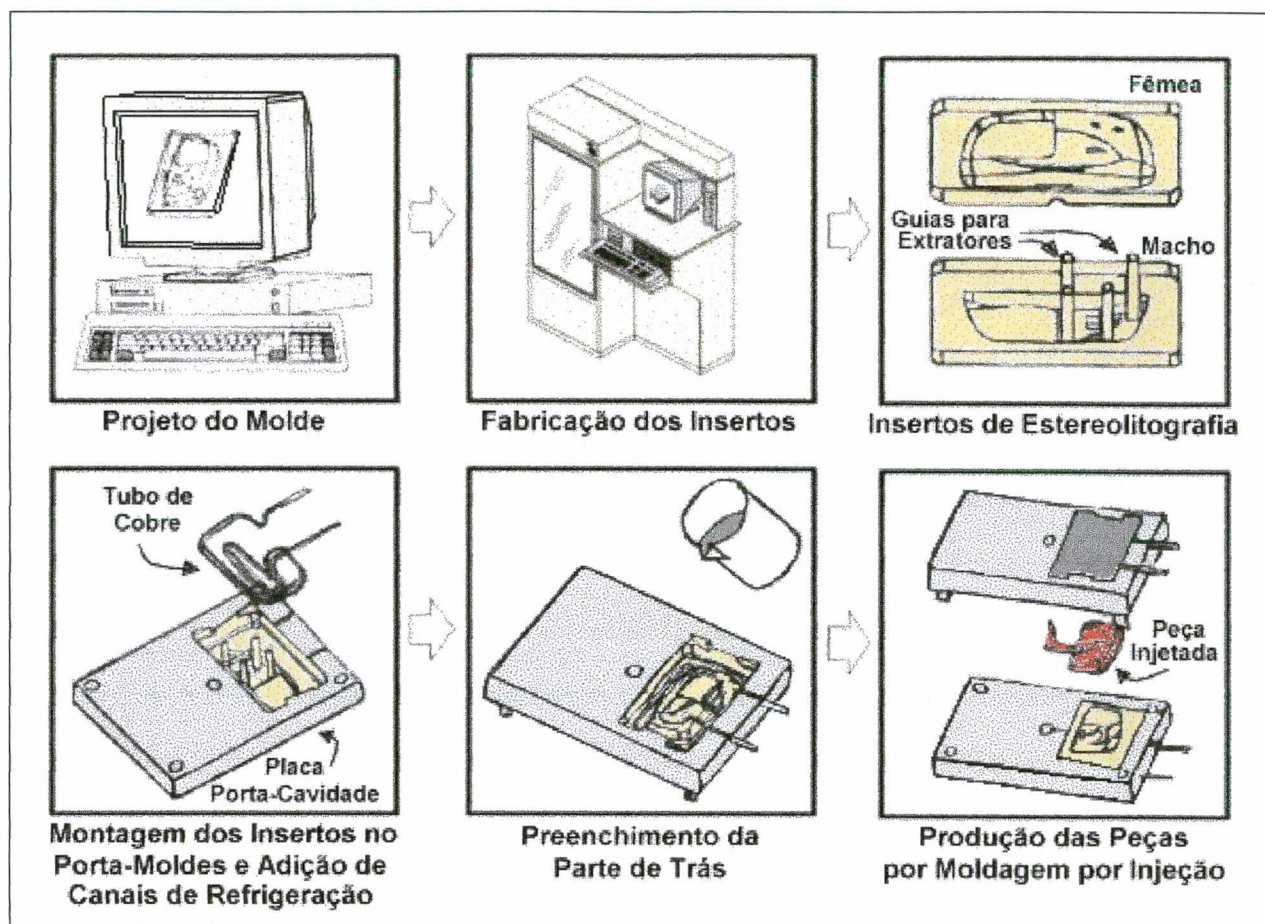


FIGURA 21 - Etapas da fabricação direta de insertos por estereolitografia [31]

A seguir, são descritas, de forma mais detalhada, essas etapas, buscando mostrar as considerações importantes em cada uma. As figuras apresentadas ao longo da descrição, quando não referenciadas, são imagens ou fotografias dos estudos de caso desenvolvidos neste trabalho (Capítulo 4).

3.3. PREPARAÇÃO DAS PLACAS PORTA-CAVIDADES

Apesar de ser recomendável o uso de porta-moldes padronizados, não é suficiente para acomodar (encaixar) insertos fabricados por estereolitografia. É preciso que as placas porta-cavidades, do porta-moldes, sejam preparadas especialmente para esse caso [86, 87].

Uma vez que água é utilizada como líquido para a refrigeração do inserto, circulando em seu interior, normalmente através de tubos de cobre, é necessário que sejam usinadas aberturas (rasgos) nessas placas (Figura 22) para a acomodação desses tubos. É importante ainda que possuam flanges, para assegurar que os insertos serão posicionados corretamente, mantendo a linha de partição do molde na altura desejada, em ambas as placas.

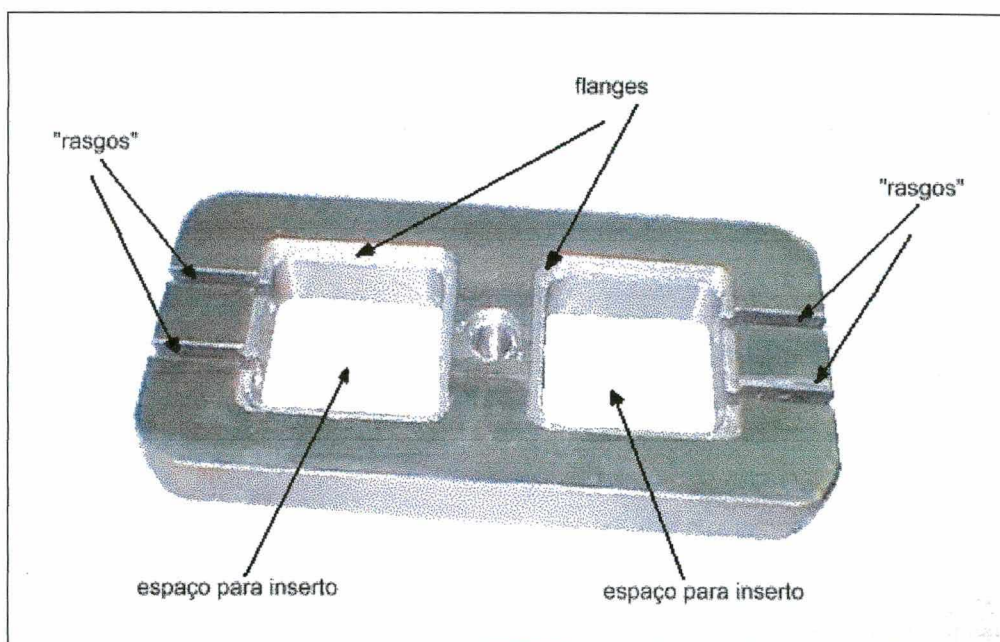


FIGURA 22 - Preparação da placa porta-cavidades

3.4. PROJETO DOS INSERTOS

Após a seleção do porta-moldes, os insertos macho e fêmea, nos quais serão montados nas placas porta-cavidades previamente preparadas, são projetados em forma de casca (Figura 23),

com o auxílio de um sistema CAD tridimensional. Os principais fatores a serem considerados nesta etapa são apresentados a seguir.

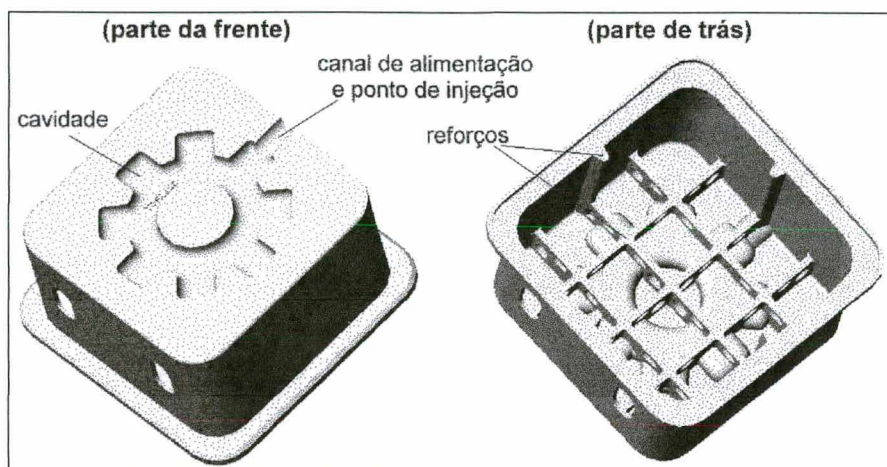


FIGURA 23 - Inserto em forma de casca

3.4.1. DIMENSÕES E CONTRAÇÃO

No cálculo das dimensões das cavidades (macho e fêmea) deve ser considerado o percentual de contração do material plástico a ser injetado. Nos moldes tradicionais, fabricados em aço, o fator de contração é conhecido [88]. Contudo, este fator pode não ser o mesmo em insertos de estereolitografia (ver item 3.4.4), pois a resina possui uma condutividade térmica muito menor, comparada aos aços-ferramenta, o que implica numa menor taxa de resfriamento da peça injetada. Isto pode afetar suas propriedades. No entanto, este valor não é suficientemente conhecido, sendo alvo de estudos recentes [37].

3.4.2. ÂNGULOS DE SAÍDA

É comum, no inserto de estereolitografia, que a falha ocorra em regiões próximas à linha de partição do molde, na forma de pequenas lascas de resina que são arrancadas com a peça, durante a extração. Isto é causado pela aderência excessiva entre a peça injetada e a parede do

inserto [30, 89], devido, principalmente, ao efeito de degraus de escada, intrínseco dos processos de fabricação por camadas, e às temperaturas e pressões elevadas, inerentes ao processo de moldagem por injeção.

Sabe-se que, quanto maior for o ângulo de saída, menor será a força de extração [42, 88, 89] e, conseqüentemente, o inserto terá uma vida maior [30, 36, 38, 90]. Uma recomendação prática é adotar o maior ângulo de saída possível, desde que não altere as características funcionais da peça [86, 87].

3.4.3. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E PONTO DE INJEÇÃO

O projeto do canal de alimentação e do ponto de injeção influi significativamente no desgaste do inserto de estereolitografia e na qualidade da peça injetada. É comum a falha do inserto ocorrer nestas regiões. O uso de um ponto de injeção mais profundo, i.e., com uma maior área transversal ao sentido do fluxo (ex: um maior diâmetro, caso seja circular), permite utilizar velocidades de injeção mais baixas, assim como pressões menores. Isto permite que o tempo de resfriamento do inserto seja maior, o que é favorável para aumentar sua vida [86, 87].

Uma recomendação para o dimensionamento dos canais de alimentação [88], utilizada para os moldes de aço e que, a princípio, pode ser aplicada aos insertos de estereolitografia, é:

$$D \geq S_{max} + 1,5 \text{ mm} \quad (1)$$

onde D é o diâmetro do canal e S_{max} é a maior espessura da peça. Outra recomendação é utilizar o ponto de injeção em forma de leque [38, 87] e adotar regras empíricas para o seu dimensionamento, em insertos de estereolitografia, qual sejam:

- A largura do ponto de injeção deve ser de 2 a 3 vezes o diâmetro (D);
- A espessura do ponto de injeção deve estar na faixa de $0,5 \times S_{max}$ a $1,0 \times S_{max}$.

É importante a realização de pesquisas para avaliar, com mais profundidade, a influência desses parâmetros na vida do inserto.

3.4.4. ESPESSURA DE CASCA

A vida do inserto de estereolitografia é limitada, devido principalmente às baixas propriedades térmicas e mecânicas das resinas epoxi, quando comparadas aos aços, e às condições adversas do processo de moldagem por injeção (elevadas temperaturas e pressões). Por exemplo, a condutividade térmica da resina é 0,2002 W/m.K (para a resina Ciba-SL-5170), cerca de 300 vezes menor do que os aços-ferramenta. Outra propriedade, a temperatura de transição vítrea, está na faixa de 65 a 90°C.

Durante a injeção, quando o material plástico é injetado no interior do molde, a temperatura dos insertos aumenta, podendo alcançar a temperatura de transição vítrea da resina. Se permanecerem numa temperatura elevada, principalmente durante a extração da peça, pequenas “lascas” do inserto serão arrancadas, a cada ciclo, mesmo com o uso de um bom agente desmoldante, levando ao fim de vida do molde. Assim, é importante manter a temperatura dos insertos em níveis baixos, removendo o calor, proveniente do plástico injetado, o mais rápido possível. Ainda, a remoção rápida de calor é também importante para reduzir o tempo de ciclo de moldagem, ao solidificar rapidamente o material injetado.

No desenvolvimento deste processo, os primeiros insertos foram construídos sólidos (não em forma de casca) e sem o uso de sistema de refrigeração. Demonstrou-se [30] que a vida do molde aumenta quando os insertos são construídos em forma de casca (Figura 23) e preenchidos, na parte de trás, com materiais cuja condutividade térmica é maior do que as resinas utilizadas no processo de estereolitografia. Ao se investigar a influência de diversas espessuras de casca no comportamento de troca de calor [38], concluiu-se que, quanto menor for a espessura, maior será

a taxa de transferência de calor. Porém o inserto pode deformar-se durante o preenchimento da parte de trás, sendo inutilizado.

A incorporação de nervuras, na parte de trás da casca, auxilia a evitar essas deformações [30, 38, 42, 74], no entanto, não encontrou-se, na literatura utilizada, recomendações para o projeto das mesmas.

Devido as deformações que podem ocorrer, não é recomendável usar espessuras de paredes pequenas. O mínimo recomendado para a fabricação de objetos, pelo processo de estereolitografia, é de 0,5 mm [50], no entanto, quando este objeto é um inserto, a menor espessura de casca que se conseguiu utilizar, mantendo um nível admissível de deformações durante o preenchimento, foi de 1,27 mm [38]. Mesmo assim, em alguns casos, a casca do inserto, com esta espessura, pode deformar-se a ponto de ser inutilizada antes mesmo da moldagem por injeção.

Outro aspecto positivo em construir o inserto na forma de casca é que sua massa reduz consideravelmente e, conseqüentemente, menos material é consumido e o tempo de fabricação é menor.

3.4.5. TÉCNICAS DE REFRIGERAÇÃO DO INSERTO

Em um molde tradicional, fabricado em aço, a refrigeração é importante para [88]:

- Aumentar a taxa de troca de calor entre o plástico injetado e o molde, para assim reduzir o tempo que a peça leva para solidificar-se e ser desmoldada;
- Manter a temperatura homogênea e uniforme no molde, para evitar perda de qualidade das peças injetadas, como, por exemplo, empenamento.

No inserto de resina, fabricado por estereolitografia, a refrigeração possui um objetivo adicional, que é manter a temperatura do inserto abaixo de um limite tolerável, procurando

estender sua vida e dessa forma a quantidade de peças que podem ser produzidas [30, 38, 86, 87]. Para este tipo de molde, existem basicamente duas técnicas de refrigeração interna [38]:

- Refrigeração com uso de tubos de cobre; ou
- Refrigeração incorporada à casca do inserto (*conformal cooling*).

Na primeira técnica, tubos de cobre, de pequeno diâmetro, são utilizados como canais de refrigeração, no interior do inserto. Devido à baixa rigidez dos tubos, eles podem ser facilmente conformados, em um grande número de voltas, como mostra a Figura 24. Isto aumenta o comprimento do tubo, no interior do inserto, e assim eleva o tempo de contato com o líquido refrigerante, normalmente água. A desvantagem deste procedimento é que a eficiência da troca de calor é reduzida devido ao pequeno diâmetro do tubo. Outra limitação é que os canais de refrigeração (os tubos) tendem a ficar razoavelmente distantes da superfície moldante, especialmente no inserto-macho.

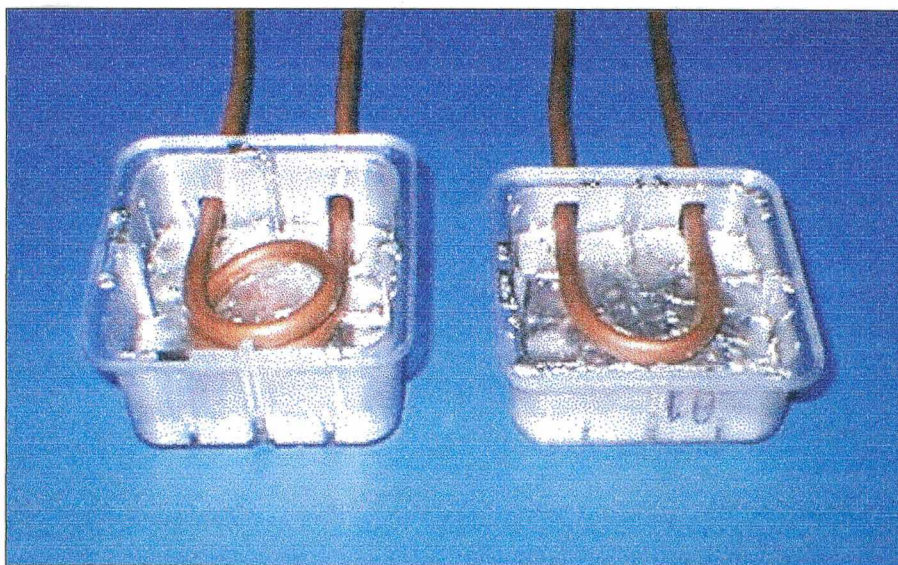


FIGURA 24 - Uso de tubos de cobre para fazer a refrigeração do inserto

Devido à facilidade de fabricar, através da estereolitografia, peças com grande complexidade de formas geométricas, inclusive com detalhes internos, uma outra técnica de

refrigeração possível é conhecida como *conformal cooling*. Neste tipo, os canais de refrigeração são modelados, durante a etapa CAD, no interior da própria casca, formando uma malha de canais próxima à superfície moldante (Figura 25).

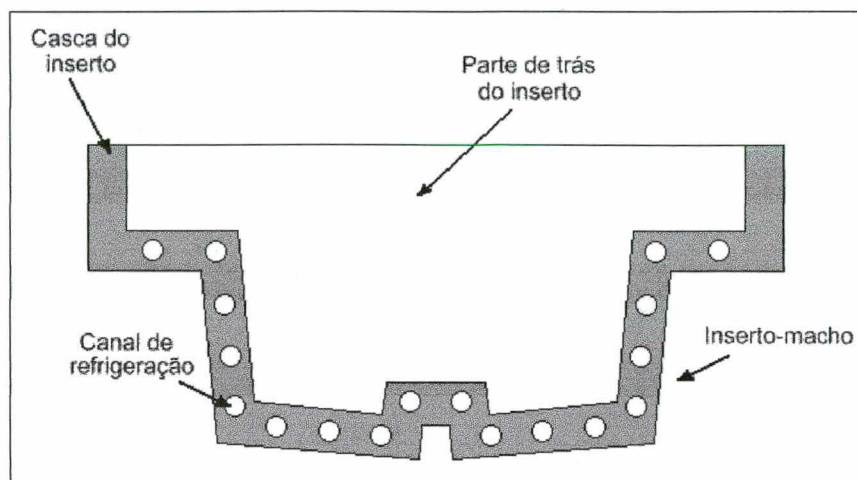


FIGURA 25 - Canais de refrigeração incorporados à casca do inserto (*conformal cooling*)

Nesta técnica, a refrigeração é mais eficiente e uniforme. Contudo, o inserto fica mecanicamente frágil e propenso a falhar, por não suportar as pressões envolvidas durante o processo de moldagem por injeção [38]. Outro fator limitante é a dificuldade de assegurar uma boa vedação e resistência mecânica, na conexão entre os canais do *conformal cooling* e as mangueiras de refrigeração. Outro aspecto negativo é que alguns tipos de resinas de estereolitografia, como a Ciba-SL-5170, absorvem umidade [91] e as peças construídas com essas resinas podem, em contato com a água, deformar-se. Assim, o uso da técnica de *conformal cooling* fica limitada a alguns tipos de resina.

Uma alternativa é utilizar refrigeração externa, que consiste em aplicar uma corrente de ar comprimido sobre as superfícies do inserto, imediatamente após a abertura do molde e extração da peça, que preferivelmente deve ser rápida. Existem controvérsias com relação a qual técnica é a mais eficiente. Segundo o pesquisador Dickens [37], o jato de ar comprimido é a mais

eficiente. O motivo é que, na refrigeração interna, o líquido refrigerante circula normalmente distante da região moldante, mesmo no caso dos canais incorporados à casca de resina (*conformal cooling*), ao contrário do ar, que estará em contato direto com as superfícies aquecidas. Dickens justifica esta afirmação baseando-se no fato que as resinas de estereolitografia possuem baixa condutividade térmica. Com isso, após uma determinada espessura de casca do inserto, a refrigeração interna terá influência desprezível na remoção de calor.

No entanto, os trabalhos realizados por Sansoucy [30] e Saurkar [38] mostraram que a refrigeração interna, com uso de metais de baixo ponto de fusão e fina espessura de casca (1,27 mm), possui influência significativa na remoção de calor.

3.4.6. SISTEMA DE EXTRAÇÃO

O uso de um sistema de extração tem por objetivo auxiliar na remoção da peça, após sua solidificação no interior do molde. Nos insertos de epoxi fabricados por estereolitografia, a extração pode ser feita através de pinos extratores, que se deslocam através de canais de guia, incorporados no próprio inserto, conforme mostra a Figura 26. O pino extrator pode se movimentar no interior dos canais, em contato direto com a resina. Contudo, não é desejável que ocorra movimento relativo entre o pino metálico e a resina, para evitar o desgaste prematuro do inserto nesta região. Uma alternativa é utilizar, no interior do canal, uma bucha metálica.

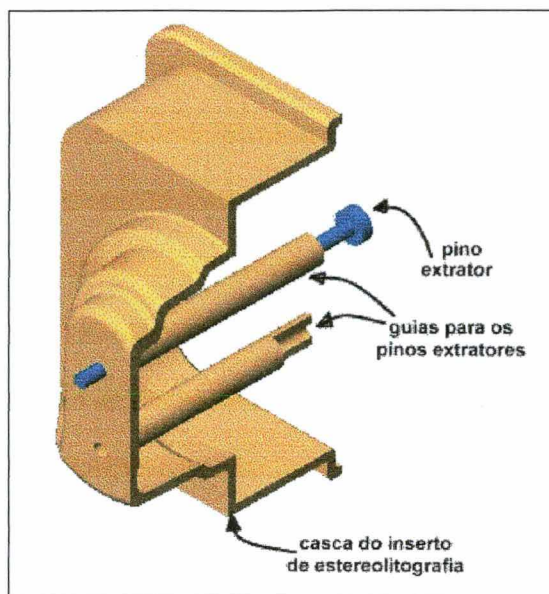


FIGURA 26 - Canais de guia para os pinos extratores no inserto

Quanto ao dimensionamento dos pinos extratores, podem ser adotadas as mesmas recomendações e regras de projeto utilizadas para os moldes convencionais [88], fabricados em aço.

3.4.7. RESOLUÇÃO DO CAD

Os sistemas CAD normalmente representam superfícies curvas (cilindros, esferas, etc.) por um determinado número de polígonos ou faces, como apresenta a Figura 27 [50]. Quanto maior for a quantidade de polígonos, melhor será a representação ou aproximação. Isto resulta superfície uniforme, ao invés de facetada.

Porém, na estereolitografia, essas aproximações do sistema CAD são reproduzidas no objeto acabado. Para diminuir este efeito, é importante aumentar a resolução do CAD (quantidade de polígonos), especialmente quando o modelo eletrônico final for gerado, normalmente no formato STL, que representa as superfícies de um objeto por uma malha de triângulos [1].

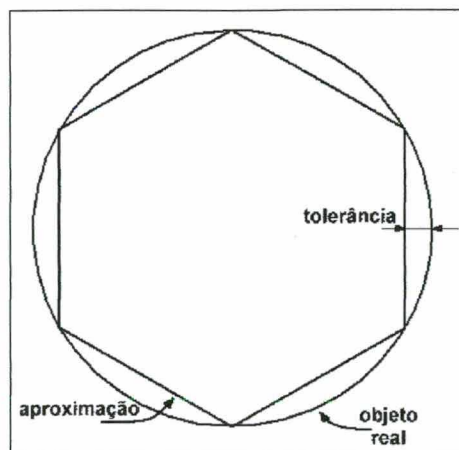


FIGURA 27 - Aproximação de um círculo por um polígono

3.5.FABRICAÇÃO DOS INSERTOS POR ESTEREOLITOGRAFIA

Com relação à fabricação dos insertos, na máquina de estereolitografia (Figura 28), as principais considerações nesta etapa são apresentadas a seguir.



FIGURA 28 - Fabricação dos insertos na máquina de estereolitografia

3.5.1. SELEÇÃO DA RESINA DE ESTEREOLITOGRAFIA

Os insertos de estereolitografia, durante o processo de moldagem por injeção, estão submetidos à condições adversas, pois o termoplástico é injetado em temperaturas normalmente acima de 200°C e pressões de pelo menos 150 bar. É importante que a resina, à base de epoxi, utilizada na fabricação dos insertos, suporte essas condições. Existem vários tipos de resinas para estereolitografia disponíveis comercialmente e fornecidas principalmente pelas empresas *Ciba Specialty Chemicals* (EUA), *DuPont/DSM SOMOS®* (EUA) e *RPC Ltd.* (Suíça).

De acordo com o tipo e potência do laser da máquina de estereolitografia, existem diferentes resinas que podem ser selecionadas. Por exemplo, para uma máquina SLA-250, com laser de He-Cd, as resinas que podem ser utilizadas são apresentadas na Tabela 1 [92, 93, 94]. No entanto, para outras máquinas, existem resinas mais apropriadas à confecção de insertos, como a Ciba-SL-5530HT, cuja temperatura de transição vítrea é superior a 120 °C, além de ser resistente à umidade.

Contudo, a seleção da resina apropriada não depende apenas de suas propriedades ou da máquina utilizada, sendo importante considerar fatores econômicos do processo. Para a máquina de estereolitografia funcionar, é preciso que um reservatório esteja totalmente preenchido de resina. A máquina SLA-250, por exemplo, é a que possui o menor reservatório e, conseqüentemente, o menor volume de trabalho. As dimensões de seu reservatório são de 250 x 250 x 250 mm, o que representa cerca de 40 kg de resina que precisa ser adicionada, apenas para a máquina entrar em funcionamento. No mercado norte americano, o custo médio das resinas é de aproximadamente US\$250,00 por quilograma [95]. Além desta quantidade inicial, é necessário adicionar mais resina a cada peça que é fabricada, na quantidade referente a massa desta peça. Assim, para fazer a substituição de uma resina por outra, tem-se um custo de pelo

menos US\$10.000,00, o que pode ser inviável economicamente, para alguns *bureaus* de serviços, caso a substituição seja só para atender uma aplicação específica.

TABELA 1 - Propriedades da resinas de SL utilizadas em máquinas SLA-250/30

MATERIAL (*)	SL 5170	SL 5210	SL 5220	SOMOS 6110	SOMOS 7110	SOMOS 8110	RPCure 300HC
Fornecedor	Ciba	Ciba	Ciba	DuPont/ DSM	DuPont/ DSM	DuPont/ DSM	RPC Ltd.
Módulo de tensão (MPa)	2400-2500	1455	2703	2800	2117	317	3000
Resistência à tração (MPa)	59-60	15	62	69	56	18	67
Elongação até a ruptura (%)	7-19	1,2	8,3	10	5,4-7,1	27	3
Resistência à flexão (MPa)	107-108	44	94	94	85	11	-
Módulo de flexão (MPa)	2920-3010	1724	2951	2600	2434	310	2500
Resistência ao impacto (J/m)	27-30	21	37	27	27,8	87	-
Dureza (Shore D)	85	84	86	87	82	77	86
Temperatura de transição vítrea (°C)	65-90	60	53	-	-	-	120
Temperatura de deflexão térmica (°C)	55 (66 psi)	47 (66 psi)	46 (66 psi)	50	59-72	54	-
Sensível a umidade?	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Não

(*) Dados obtidos após pós-cura com luz ultravioleta

Existem pesquisas para o desenvolvimento de resinas de alta performance, que apresentam temperatura de transição vítrea da ordem de 200 °C [96]. São constituídas basicamente por dois monômeros de cristal líquido que, após a cura, apresentam ainda anisotropia mecânica. Há também o desenvolvimento de resinas com carga cerâmica [97], no entanto, essas resinas ainda não estão disponíveis a nível comercial.

3.5.2. ORIENTAÇÃO ESPACIAL DO INSERTO

Na estereolitografia, a orientação espacial do objeto a ser fabricado é um importante parâmetro, pois afeta tanto a qualidade deste objeto (por exemplo, incerteza dimensional e

rugosidade superficial) quanto o tempo de fabricação. Para obter uma melhor qualidade, é importante orientá-lo de tal forma que minimize o efeito de degraus de escada, já comentado, e evite regiões de volume retido (*trapped volume*) [52]. O volume retido pode ser definido como uma região que mantém resina líquida em seu interior durante a construção, como, por exemplo, um copo ou uma xícara construída com a boca voltada para cima. Nas regiões de volume retido, é difícil fazer o controle da correta espessura de fatiamento.

Um inserto projetado em forma de casca é um típico objeto com a característica de volume retido, seja na região da cavidade, caso esta esteja orientada para cima (Figura 29.a), ou na região da parte de trás, caso a cavidade esteja para baixo (Figura 29.b). Essas são, a princípio, as duas orientações recomendáveis. Outras alternativas irão, geralmente, aumentar o efeito de degraus de escada e o tempo de fabricação.

A região da cavidade é normalmente a que apresenta o menor volume retido, quando comparada à região da parte de trás do inserto. Assim, é recomendável que a cavidade esteja orientada para cima (Figura 29.a) e não o contrário. Outro fator que justifica esta recomendação é que, com esta orientação, os suportes para a fabricação, conforme descrito no próximo item deste trabalho, não ficarão em contato direto com as superfícies da cavidade. Isto é importante pois, quando os suportes são removidos, após a fabricação, podem deixar irregularidades e marcas nas superfícies que suportavam, o que é indesejável, principalmente na cavidade.

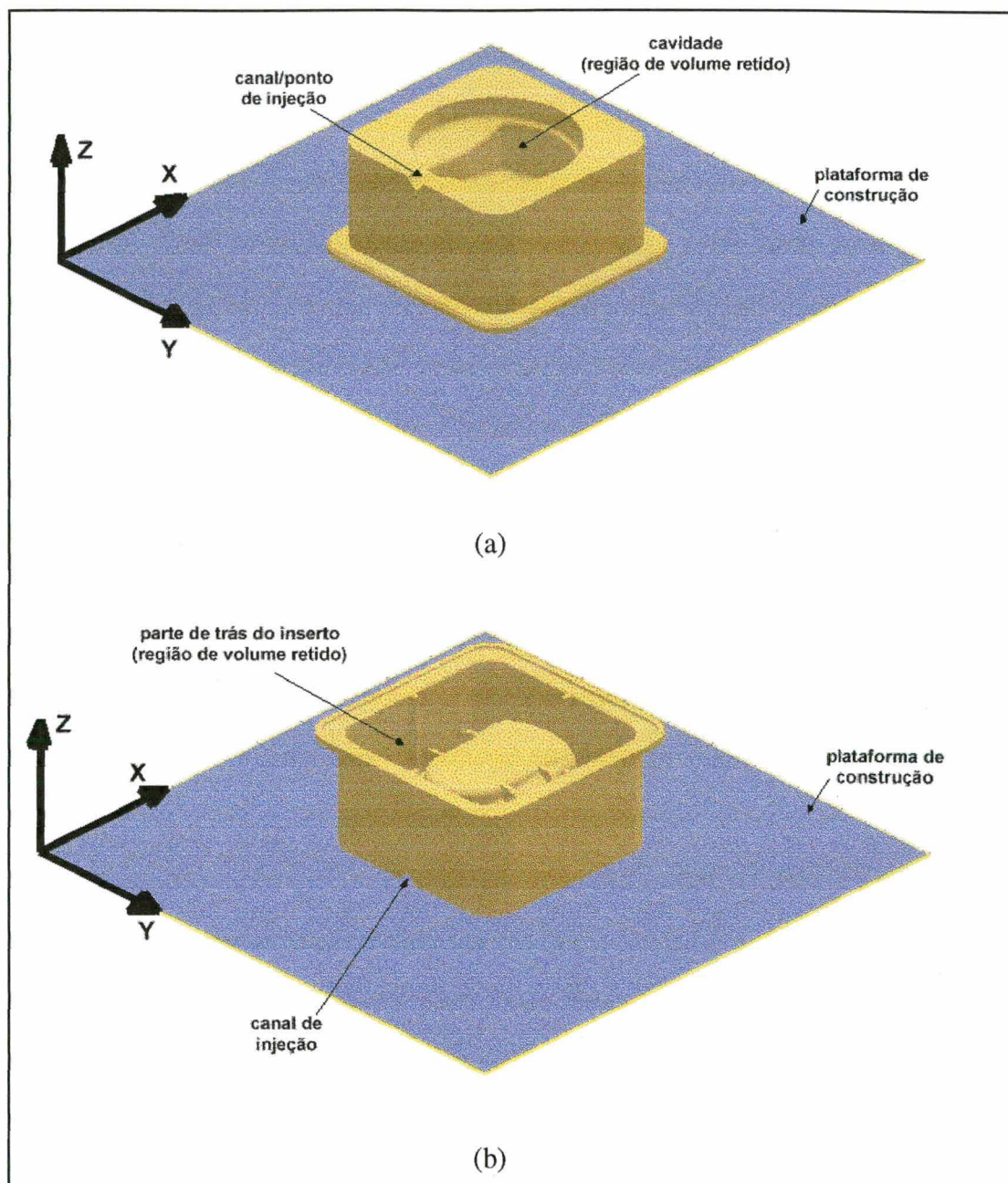


FIGURA 29 - Possíveis orientações espaciais para a fabricação de insertos em forma de casca.

(a) Cavidade voltada para cima; (b) Cavidade voltada para baixo

3.5.3. PROJETO DOS SUPORTES PARA A FABRICAÇÃO

O processo de estereolitografia requer o projeto e a fabricação de suportes para a fabricação do objeto, conforme citado no Capítulo 2. O projeto dos suportes, que é realizado após a definição da orientação espacial do objeto, no caso um inserto, pode ser feito de forma

automática, onde os suportes são gerados automaticamente por um sistema CAD específico, ou manualmente, mas também com uso de CAD. Mesmo na geração automática de suportes, é preciso que haja a intervenção do operador, pois o processo não é livre de erros. É comum algumas superfícies ficarem com suportes inadequados, tanto no que se refere aos tipos de suportes quanto à quantidade necessária para suportar suficientemente a peça, especialmente se sua forma geométrica for complexa. As principais recomendações para o projeto de suportes, para a fabricação de insertos por estereolitografia, são:

- Evitar que os suportes fiquem em contato direto com as superfícies da cavidade (fêmea ou macho), procurando suportar a parte de trás do inserto;
- Evitar os suportes do tipo “cantoneira” (*gusset*) (Figura 30), pois estes ficam presos tanto em superfícies horizontais quanto nas verticais de cantos (por exemplo, na interface de uma parede horizontal com uma vertical), dificultando sua remoção, após a fabricação, além de deixarem marcas;

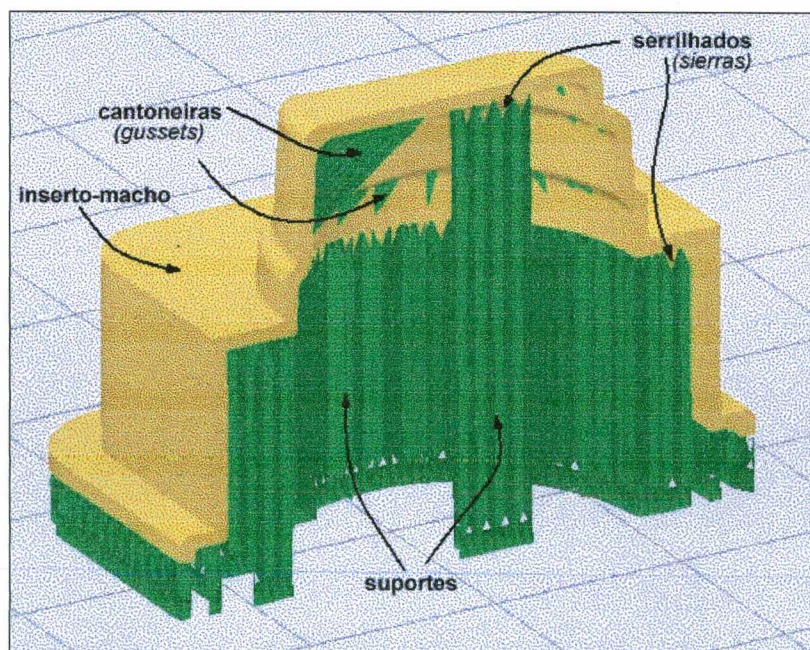


FIGURA 30 - Suportes em um inserto de estereolitografia (vista em corte)

- Utilizar serrilhas (*sierras*) (Figura 30) nas interfaces de contato entre o suporte e o inserto, pois isto facilita a remoção posterior dos suportes;
- Seguir as demais recomendações para o projeto de suportes, apresentadas nas referências [1, 50, 53].

3.5.4. ESPESSURA DE FATIAMENTO

Uma característica da estereolitografia é que a fabricação do objeto se dá pela adição sucessiva de finas camadas. Quanto menor for a espessura de cada camada, menor será o efeito de degraus de escada, conforme apresentado no Capítulo 2, e, conseqüentemente, o objeto (um inserto) terá um melhor acabamento superficial e um menor desvio dimensional [98]. Em contrapartida, o tempo de fabricação aumenta.

Assim, um importante fator a ser considerado é a espessura de camada (ou de fatiamento). A definição deste parâmetro, na estereolitografia, depende principalmente do tipo de resina utilizado, do modelo do equipamento (tipo de laser e precisão dos mecanismos) e do estilo de construção adotado. Por exemplo, para uma máquina SLA-250/30, com uso de resina Ciba-SL-5170, no estilo de construção *ACES*, o utilizado na fabricação de insertos, a menor espessura de fatiamento possível é de 0,15 mm. Enquanto que para uma máquina SLA-7000, nas mesmas condições, pode-se utilizar espessuras de 0,025 mm.

3.5.5. ESTILOS DE CONSTRUÇÃO DA ESTEREOLITOGRAFIA

O estilo de construção é uma lista de parâmetros utilizados durante a etapa de fatiamento do modelo eletrônico da peça a ser fabricada [1]. Existem diversos estilos de construção, cada um tendo sido desenvolvido para resinas e aplicações específicas. Os principais estilos são: *QuickCast*, que produz o objeto com uma estrutura interna em forma de colméia, sendo utilizado

para a construção de modelos para microfusão; *STAR-Weave*, no qual o objeto, após a construção na máquina, possui um baixo grau de polimerização, sendo mais destinada a protótipos conceituais, principalmente com uso de resinas à base de acrílico; e *ACES (Accurate Clear Epoxy Solid)*, que é utilizado para a construção de objetos totalmente sólidos e transparentes, em resinas à base de epoxi, com alto grau de polimerização e baixo desvio dimensional.

Por definição, o processo de fabricação direta de insertos de estereolitografia, conhecido por *Direct AIM*, utiliza o estilo *ACES* para a fabricação dos insertos, haja visto que este estilo é o que produz objetos com as propriedades que mais se adaptam aos esforços mecânicos e térmicos do processo de moldagem por injeção.

3.5.6. PARÂMETROS DE RECOBRIMENTO (*RECOAT*)

O processo de recobrimento (*recoat process*), que ocorre durante a fabricação do objeto na máquina de estereolitografia, tem por objetivo aplicar e nivelar uma nova camada de resina líquida sobre a última solidificada pelo laser, mantendo a correta espessura de fatiamento. É uma combinação do movimento da plataforma de construção com o da faca de recobrimento (*recoater blade*). Consiste basicamente em mergulhar a peça em construção, através do movimento descendente da plataforma, no reservatório preenchido com a resina líquida. Isto faz com que a resina líquida cubra completamente a camada recém solidificada. Em seguida, a plataforma é deslocada para cima, a uma altura equivalente, normalmente, a soma da espessura da próxima camada com a distância da faca (*blade gap*), como mostra a Figura 31. O procedimento de mergulhar a peça não é suficiente para controlar corretamente a quantidade de resina líquida aplicada. É preciso ainda que a faca se movimente sobre a superfície da resina líquida, procurando nivelá-la. Posteriormente, um tempo de espera é ainda necessário para que ocorra a acomodação da resina.

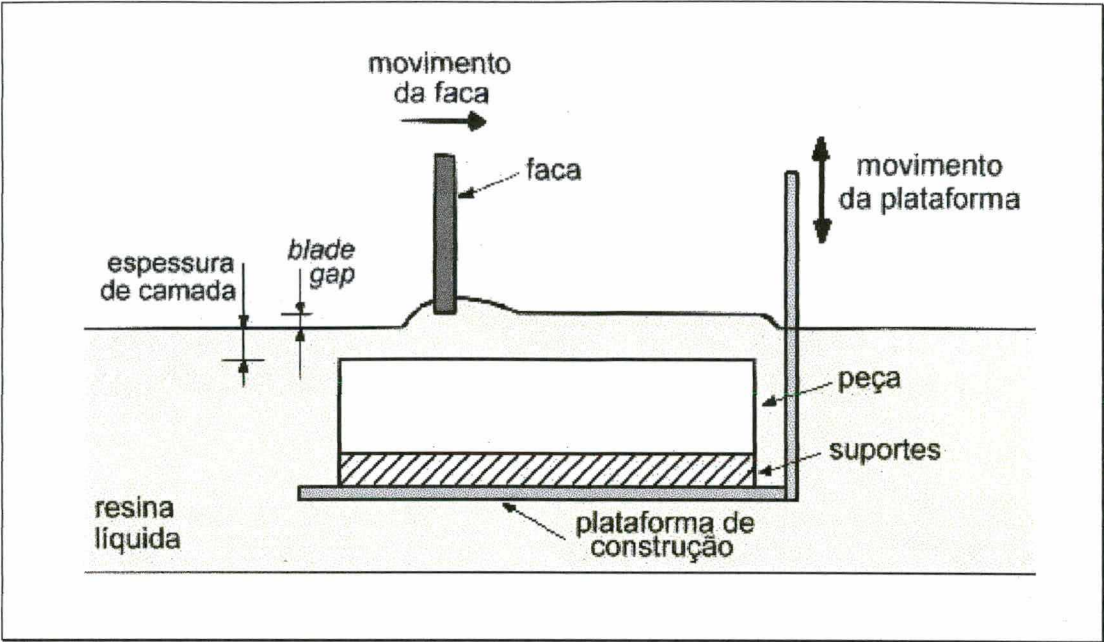


FIGURA 31 - Processo de recobrimento na estereolitografia

Na fabricação de objetos que possuem volume retido (*trapped volume*), como é normalmente o caso de insertos, é preciso cuidados especiais, durante o recobrimento, para que a correta espessura de camada seja mantida. Devido à elevada viscosidade da resina (alta tensão superficial), é comum que fique excesso de resina nesta região, mesmo após o recobrimento, afetando a qualidade do objeto fabricado. Através dos principais parâmetros do processo de recobrimento, listados na Tabela 2, é possível minimizar este efeito, seguindo as principais recomendações [1, 42, 99]:

TABELA 2 - Principais parâmetros do recobrimento

Parâmetro
Profundidade que a última camada da peça é mergulhada (<i>Z Dip Distance</i>)
Aceleração da plataforma de construção durante o mergulho (<i>Z Dip Acceleration</i>)
Quantidade de vezes que a faca se movimenta sobre a peça (<i>Number of Sweeps</i>)
Velocidade do movimento da faca (<i>Blade Sweep Period</i>)
Distância da faca (<i>Blade Sweep Gap</i>)
Tempo de espera (<i>Z Level Wait Time</i>)

- Fazer com que a faca se movimente pelo menos três vezes, sendo as duas primeiras com velocidades rápidas e a última com velocidade mais lenta;
- Aumentar a profundidade de mergulho, com uma baixa aceleração;
- Aumentar o tempo de espera;
- Aumentar a temperatura da resina durante a fabricação para diminuir sua viscosidade.

3.6. PÓS-PROCESSAMENTO DOS INSERTOS

Completada a fabricação na máquina de estereolitografia, o inserto requer uma etapa de pós-processamento. Isto envolve procedimentos de limpeza, remoção dos suportes, acabamento superficial e pós-cura. A Figura 32 apresenta uma fotografia de dois insertos (macho e fêmea) fabricados por estereolitografia, após passarem pelas etapas de pós-processamento.

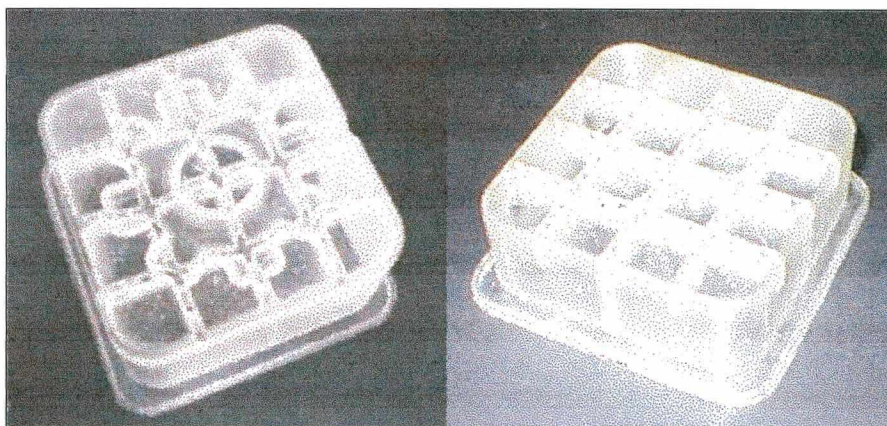


FIGURA 32 - Insertos fabricados por estereolitografia

3.6.1. LIMPEZA

Os insertos, durante a fabricação, ficam submersos no reservatório preenchido com resina líquida. Devido a isso é necessário que, após a fabricação, passem por uma etapa de limpeza, com uso de solventes, justamente para a remoção da resina líquida que fica ao seu redor.

É importante definir o solvente apropriado [100], i.e., que dissolva efetivamente a resina líquida que encontra-se ao redor do inserto, sem danificar suas superfícies, e que atenda normas de segurança. Algumas opções são: álcool isopropílico, acetona, TPM (éter monometílico de tripopileno-glicol), DPM (éter monometílico de dipropileno-glicol) e DBE (éster dibásico). A escolha do solvente depende principalmente do tipo de resina utilizado. Para as resinas SOMOS®7100, por exemplo, o álcool isopropílico é inapropriado [100], contudo, este solvente é recomendado para a resina Ciba-SL-5170 [50].

Além da escolha do solvente, outro fator que precisa ser considerado, na etapa de limpeza do inserto, é o tempo de permanência do solvente em contato com o inserto. Este tempo deve ser suficiente apenas para a remoção da resina líquida, sem afetar as propriedades do inserto. Além do tipo de resina utilizado, este tempo é também dependente do método de limpeza adotado (pulverização, banho manual, banho com ultra-som, etc.).

3.6.2. REMOÇÃO DE SUPORTES

A remoção dos suportes, construídos durante a fabricação do inserto, consiste em quebrá-los, na região de interface com os insertos. Quando são adotadas suportes do tipo serrilhas (*sierras*), a separação se torna mais fácil, podendo ser realizada manualmente e sem uso de ferramentas.

3.6.3. PÓS-CURA

A pós-cura visa completar o processo de polimerização do objeto fabricado por estereolitografia [1, 50], no caso um inserto. É realizada em uma câmara específica, onde a peça é mantida, durante um certo tempo, exposta continuamente à radiação ultravioleta, e/ou em um

forno elétrico, com temperatura controlada [101]. De acordo com a massa da peça, no caso um inserto, tem-se um tempo de exposição recomendado, assim como uma temperatura apropriada.

Sabe-se que, de acordo com o tipo de resina utilizado, a peça pode sair da máquina de estereolitografia com diferentes graus de polimerização [36, 102]. Contudo, por ser recente, há poucos dados a respeito, assim como um certo desconhecimento de como a etapa de pós-cura afeta as propriedades das peças. Existe, no cenário da fabricação por camadas, uma discussão sobre a real necessidade da pós-cura na estereolitografia. Na prática, alguns fornecedores de serviços descartam esta etapa. Dentro de um conceito de fabricação por camadas, tempo é um fator importante. Em muitos casos é preciso construir e entregar um protótipo (ou uma peça) ao cliente em questão de dias ou até mesmo horas. Qualquer passo que possa ser reduzido ou eliminado trará benefícios ao setor.

No que se refere às propriedades mecânicas, especificamente a resistência máxima à tração, verificou-se que, para a resina Ciba-SL-5170, esta propriedade não é afetada de forma significativa pelo tempo de pós-cura, independente também do método adotado (pós-cura com temperatura ou com radiação ultravioleta) [39, 54, 55]. No entanto, outra propriedade mecânica, a dureza (*Shore D*), já é afetada pelo método de pós-cura e pelo tempo de exposição [36, 102], porém, nesta pesquisa, utilizou-se outras resinas (Somos® 6100 e 7100). Assim, é necessário a realização de mais pesquisas nesta área, visando determinar a real influência da etapa de pós-cura em peças de estereolitografia.

3.6.4. ACABAMENTO SUPERFICIAL

Na estereolitografia, o princípio de fabricação por camadas provoca uma superfície regular, contudo com uma rugosidade superficial elevada, especialmente nas superfícies verticais (no sentido do fatiamento), como mostra a Figura 33. Isto se deve basicamente a dois fatos: ao efeito de degraus de escada e ao perfil parabólico do laser, durante a cura da resina, conforme

mostra a Figura 34. De uma forma geral, a rugosidade superficial das superfícies verticais é ditada pela espessura de camada [1, 89, 98], que normalmente é de 0,15 mm, para uma máquina SLA-250.

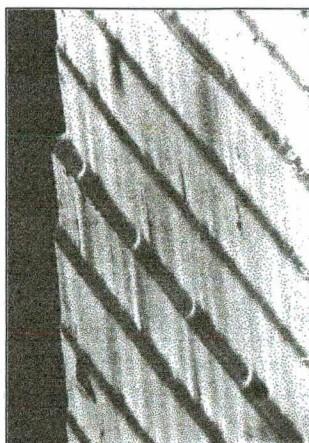


FIGURA 33 - Parede vertical fabricada por SL (microscópio, 300X) [28]

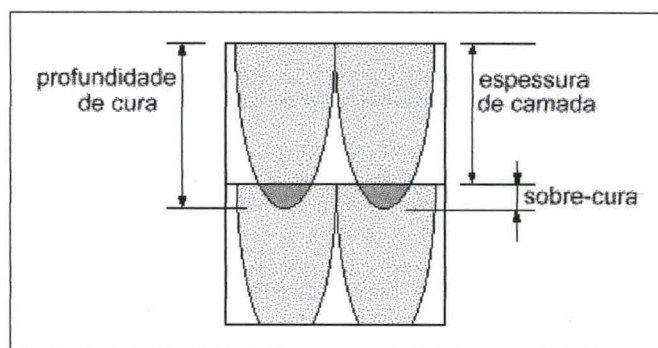


FIGURA 34 - Perfil parabólico do laser na cura do polímero [36]

Dependendo da aplicação, a rugosidade elevada nas paredes verticais pode não ser importante, como, por exemplo, em protótipos de visualização. Contudo, se o objeto fabricado por estereolitografia é um inserto, esta rugosidade é prejudicial, tanto à qualidade da peça injetada quanto à vida do inserto. No que se refere à qualidade, é fácil entender que a rugosidade elevada, na região da cavidade, será reproduzida na peça injetada.

Quanto à vida do inserto, a alta rugosidade superficial provoca a aderência excessiva entre as superfícies da peça injetada e as paredes do inserto. Essa aderência eleva a força de extração [36, 89, 98] que, juntamente com as condições adversas do processo de moldagem de injeção, fazem com que sejam arrancadas pequenas lascas do inserto, principalmente durante a extração da peça, normalmente em regiões próximas à linha de partição. O lascamento do inserto leva, conseqüentemente, ao seu fim de vida.

O problema da rugosidade elevada pode ser minimizado através de técnicas de acabamento superficial, normalmente feito manualmente. Isto envolve lixamento, que geralmente é realizado em vários passos, primeiro utilizando lixas com granulometria alta e, gradativamente, passando para lixas com granulometrias menores, até que se obtenha a rugosidade superficial desejada. Em alguns casos, para a obtenção de uma rugosidade ainda menor, pode ser utilizado, após o lixamento, procedimentos de polimento (com massa de polir), da mesma forma que normalmente é feito nos moldes de aço.

Contudo, os resultados desses procedimentos manuais dependem da habilidade do operador [36], pois não é uma tarefa simples controlar a quantidade de material que é removida e, conseqüentemente, controlar a tolerância dimensional do inserto, como mostra esquematicamente a Figura 35.

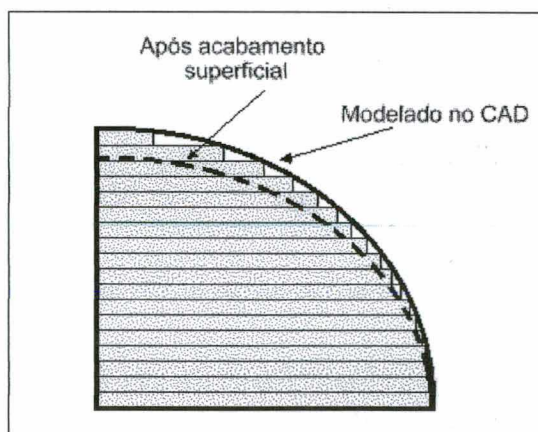


FIGURA 35 - Perda de tolerância dimensional após procedimentos de acabamento superficial

A etapa de acabamento superficial normalmente consome muito tempo em relação às outras para a fabricação de insertos de resina por estereolitografia, contudo é necessária. Pode também ser realizada após o preenchimento da parte de trás dos insertos.

Em certas regiões do inserto, geralmente na cavidade-fêmea (ao invés da cavidade-macho), é difícil realizar o acabamento pelas técnicas tradicionais, pois não há espaço suficiente para o acesso das ferramentas usadas para fazer o lixamento ou o polimento. Uma pesquisa realizada no *Georgia Institute of Technology* [36] investigou o uso de várias técnicas para reduzir a rugosidade superficial de insertos de estereolitografia, dentre elas o lixamento, polimento, acabamento por vibração (*vibratory finishing*) e por fluxo abrasivo (*abrasive flow machining*), concluindo que é através de polimento com pasta abrasiva que se obtém a menor rugosidade. Sugere ainda o desenvolvimento de um dispositivo automático de polimento para realizar o acabamento de insertos de estereolitografia.

No entanto, a alternativa mais recomendada para reduzir a rugosidade superficial e talvez até eliminar a etapa de acabamento é minimizar o efeito de degraus de escada, durante a própria fabricação, através do uso de espessuras de camadas cada vez menores [98]. Porém esta é uma limitação atual da maioria dos sistemas comerciais de fabricação por camadas, que trabalham normalmente com espessuras somente na faixa de 0,10 mm a 0,15 mm, o que ainda é insuficiente para eliminar a etapa de acabamento.

A vida do inserto de estereolitografia é maior quando a rugosidade de suas superfícies é baixa, contudo, esta influência não é conhecida de forma quantitativa, segundo [36, 89], assim como não existe ainda uma faixa de rugosidade recomendada, para insertos de estereolitografia, sendo preciso a realização de mais pesquisas relacionadas a este tema.

3.7.MONTAGEM DOS INSERTOS NAS PLACAS PORTA-CAVIDADES

Esta é uma das etapas mais simples do processo, onde os insertos são montados nas placas porta-cavidades, previamente preparadas. O fator mais importante a ser considerado nesta etapa é a altura da linha de partição do molde. Como a resina de estereolitografia possui uma resistência mecânica menor do que o aço, é recomendado que a superfície de fechamento, na região moldante do inserto, esteja a uma altura h acima da linha de partição do molde, normalmente na ordem de 0,1 mm [38], como mostra esquematicamente a Figura 36. Isto tem como objetivo assegurar o fechamento do molde, especialmente na região moldante, evitando o vazamento do material plástico injetado, durante a moldagem por injeção, que resultará em rebarbas na peça injetada. Como os insertos de estereolitografia são normalmente usados para a produção de pequenas séries de peças, é até admissível um pouco de rebarbas nas peças injetadas, no entanto, não são desejáveis.

Para auxiliar a montagem dos insertos, recomenda-se [86, 87] aplicar cera de carnaúba ou automotiva (à base de silicone) nas interfaces entre as paredes laterais do inserto e as da placa porta-cavidades. A Figura 37 apresenta uma fotografia de insertos (macho e fêmea) montados nas respectivas placas porta-cavidades do molde.

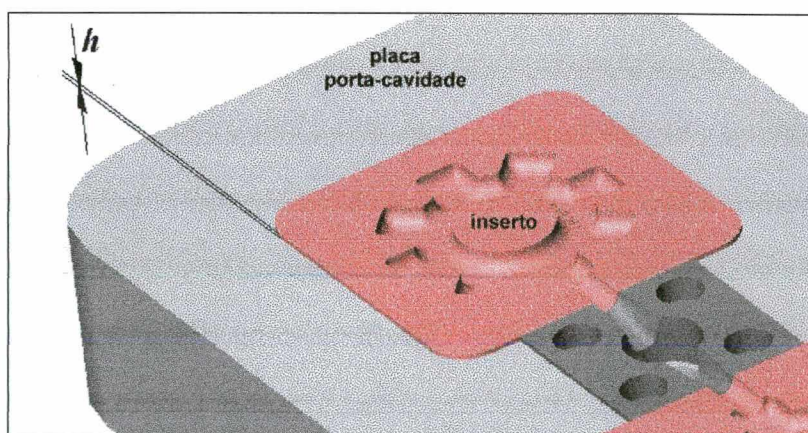


FIGURA 36 - Altura da linha de partição na montagem do inserto de estereolitografia no molde

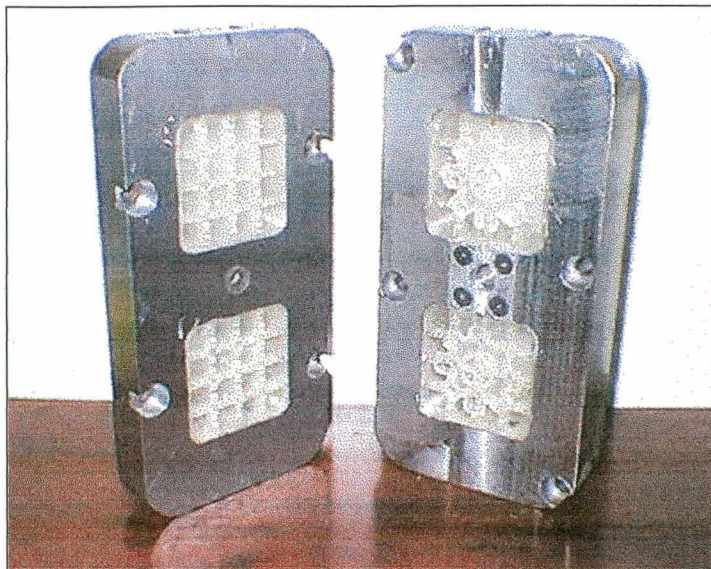


FIGURA 37 - Insertos montados nos postigos das placas porta-cavidades

3.8. PREENCHIMENTO DA PARTE DE TRÁS DOS INSERTOS

3.8.1. ADIÇÃO DOS TUBOS DE COBRE

Conforme já comentado no item 3.4.5, existem basicamente duas formas de se fazer a refrigeração interna dos insertos, seja pelo uso de tubos de cobre ou de canais incorporados aos próprios insertos (*conformal cooling*). No desenvolvimento dos estudos de caso deste trabalho, foram utilizados tubos de cobre, conforme será apresentado no próximo capítulo.

A adição dos tubos de cobre, de pequeno diâmetro, deve ser feita antes do preenchimento da parte de trás dos insertos. Consiste basicamente em dobrar os tubos e posicioná-los na parte de trás dos insertos, como mostra a Figura 38. Pode ser utilizado um gabarito tanto para auxiliar o dobramento dos tubos no formato desejado quanto outro para assegurar o correto posicionamento dos tubos no inserto.

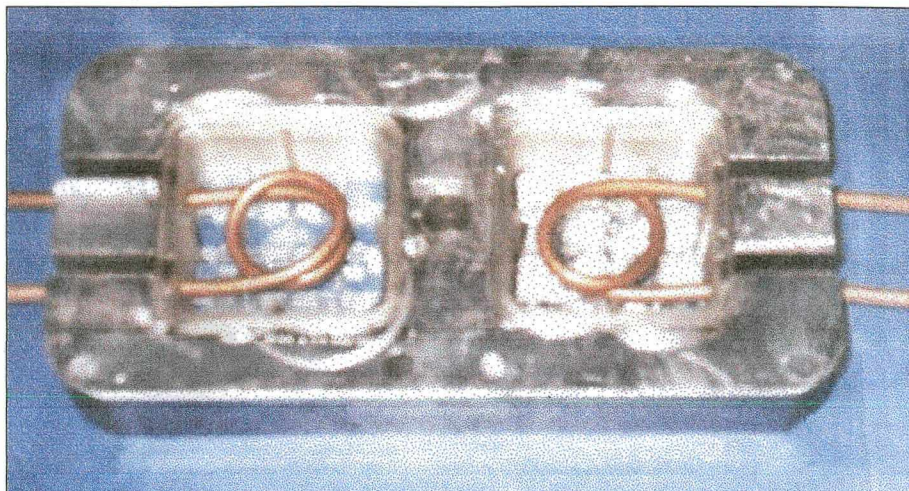


FIGURA 38 - Posicionamento dos tubos de cobre na parte de trás do inserto

3.8.2. FUNÇÕES DO PREENCHIMENTO

A função básica do preenchimento é dar ao inserto, que é fabricado em forma de casca, a resistência mecânica necessária para suportar os esforços em que são submetidos durante o processo de moldagem por injeção.

Adicionalmente, o preenchimento é também responsável pela troca de calor no molde, podendo contribuir para uma melhor refrigeração, aumentando a taxa de transferência de calor, desde que sejam utilizados materiais que possuem boa condutividade térmica em relação às resinas de estereolitografia. Neste caso, o preenchimento auxilia para uma vida maior do inserto.

3.8.3. MATERIAIS DE PREENCHIMENTO

Existem diversos materiais que podem ser utilizados como preenchimento. O mais comum, indicado na literatura [12, 29, 30, 31, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 86, 87, 89, 90, 102, 103], é um composto formado basicamente por resina epoxi (70% em volume) e partículas de alumínio (30% em volume). No entanto, mesmo possuindo partículas de alumínio, que possui uma boa condutividade térmica, este composto não contribui efetivamente para o aumento da

taxa de transferência de calor no inserto [38]. A cura deste composto (da resina epoxi) é uma reação exotérmica, que provoca o aquecimento do inserto. Em alguns casos, isto pode deformá-lo, inutilizando-o antes mesmo da moldagem por injeção das peças. Ao adicionar, neste composto, um outro elemento (grafite em pó), há uma sensível diferença no aumento da condutividade térmica [38].

Porém, os melhores resultados obtidos, descritos na literatura [38], não foram alcançados com o uso de composto de resina epoxi, grafite em pó e partículas de alumínio, mas sim com ligas metálicas de baixo ponto de fusão, à base de bismuto, conhecida comercialmente como *Metspec*. Outra vantagem das ligas de baixo ponto de fusão é que podem ser reaproveitadas após o uso dos insertos. Existem duas composições básicas que são recomendadas para o preenchimento da parte de trás de insertos de estereolitografia [38, 104]:

- *Metspec-158*: bismuto (50% em peso), chumbo (26,7%), estanho (13,3%) e cádmio (10%);
- *Metspec-217*: bismuto (54% em peso), estanho (26%) e cádmio (20%).

Estas ligas *Metspec* são comercializadas já preparadas, ao invés de se comprar seus elementos separadamente. Os materiais *Metspec* não são encontrados facilmente no Brasil, precisando ser importados, a um custo de aproximadamente US\$60/Kg. As principais propriedades dessas duas ligas de baixo ponto de fusão, assim como de outros possíveis materiais de preenchimento, são apresentadas na Tabela 3.

Dos materiais listados na Tabela 3, o estanho puro é o que possui a maior condutividade térmica, cerca de quatro vezes maior do que as ligas à base de bismuto (que são os materiais utilizados nos trabalhos mais recentes, descritos na literatura). No entanto, não há indicações na literatura de seu emprego, ou de suas ligas, como material de preenchimento de insertos de resina.

TABELA 3 - Propriedades de alguns possíveis materiais de preenchimento

Material	Metspec158 [104]	Metspec217 [104]	Bismuto puro	Estanho puro	Chumbo puro	Epoxi e alumínio em pó (60% em peso) [69]	Resina epoxi (SL-5170) [69]
Ponto de Fusão (°C)	70	103	272	232	328	Não se aplica	Não se aplica
Condutividade térmica (W/m.k)	18,00	18,42	7,86	66,60	35,30	~2,9	0,2002
Densidade (Kg/m³)	9670	9600	9780	7310	11340	-	1215

3.9.USINAGEM DA PARTE DE TRÁS

Após a etapa de preenchimento, a superfície externa do material utilizado como preenchimento, na parte de trás, fica irregular, como mostra a Figura 39.

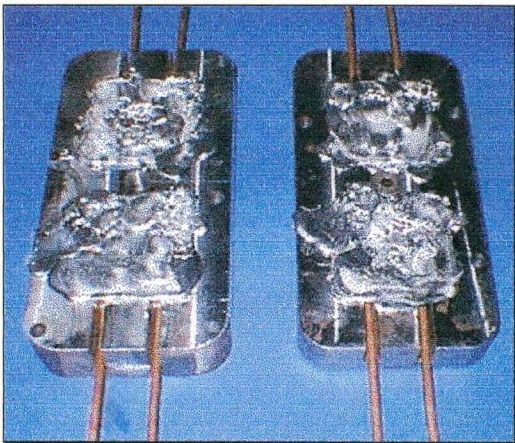


FIGURA 39 - Insertos após a etapa de preenchimento

Devido a isto, é necessário a realização de uma etapa de usinagem (normalmente fresamento), da parte de trás do inserto, que tem como objetivo uniformizar e nivelar a altura do material de preenchimento em relação à placa porta-cavidades. Esta etapa é relativamente simples (Figura 40), não sendo necessário cuidados especiais, além dos procedimentos normais de usinagem.



FIGURA 40 - Insertos sendo usinados na parte de trás

3.10. MONTAGEM DO MOLDE

Os cuidados para a montagem dos outros componentes do molde (Figura 41), assim como sua montagem na máquina injetora (Figura 42), são os mesmos dispensados para um molde comum.

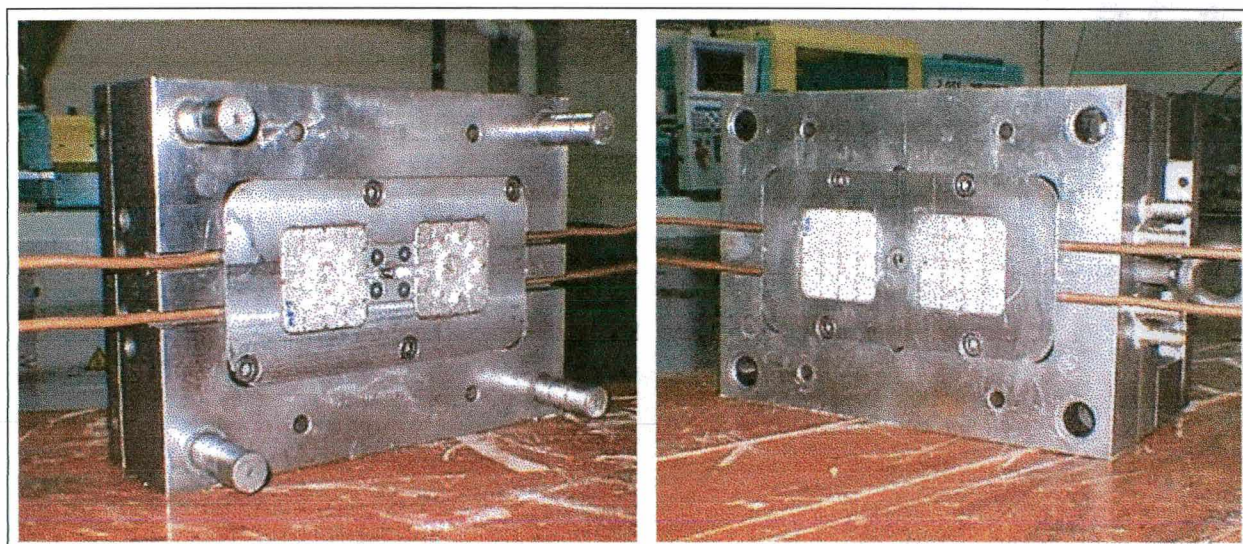


FIGURA 41 - Porta-moldes com insertos de estereolitografia

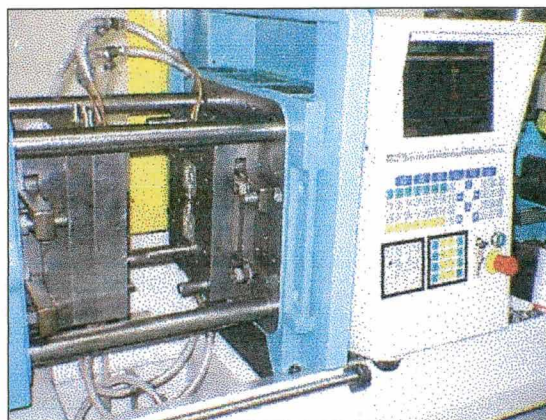


FIGURA 42 - Molde na máquina injetora

3.11. MOLDAGEM POR INJEÇÃO

A moldagem por injeção, com uso de moldes com insertos de estereolitografia, é similar à empregada com moldes tradicionais, no entanto, alguns cuidados são necessários quanto ao ajuste dos parâmetros do processo. Isto porque é nesta etapa que a falha do inserto ocorre [90], podendo ser tanto no momento da injeção do material termoplástico, devido a um súbito aumento de pressão nas cavidades, quanto na extração da peça [89, 90]. É normalmente recomendado [36, 38, 87, 98] o uso de:

- **Uma velocidade de injeção baixa**, para auxiliar na redução do efeito abrasivo, provocado pelo atrito entre as superfícies do inserto e o termoplástico durante a injeção, haja visto que as superfícies do inserto são relativamente macias, com pouca resistência à erosão. O uso de velocidades baixas também auxilia para uma maior vida do inserto a medida que permite um maior tempo para refrigeração;
- **A menor temperatura de processamento possível para o material em uso**, pois as resinas de estereolitografia possuem baixa temperatura de transição vítrea, baixa condutividade térmica e baixa resistência mecânica, principalmente quando aquecidas.

O aspecto negativo de usar temperaturas baixas é que eleva a viscosidade do termoplástico e, conseqüentemente, aumenta o efeito abrasivo citado anteriormente;

- **Tempo de refrigeração longo**, devido à baixa condutividade térmica da resina de estereolitografia. Deve ser longo suficiente para que a extração da peça injetada ocorra após sua solidificação. Contudo, não pode ser longo demais, pois pode elevar consideravelmente a força de extração [90], devido à contração do termoplástico, e, conseqüentemente, pode fazer com que pequenas lascas do inserto sejam arrancadas com peça, conforme já comentado;
- **Período de molde aberto longo**, para que os insertos tenham tempo suficiente para retornarem a uma temperatura adequada, normalmente abaixo de 40°C, antes do início do próximo ciclo de moldagem;
- **Agente desmoldante**, à base de silicone, para auxiliar na extração da peça injetada;
- **Alta vazão de líquido refrigerante**, normalmente água, para favorecer a remoção de calor tanto do termoplástico injetado quanto do inserto. Após a extração da peça, pode-se também utilizar jato de ar, sobre as paredes do inserto, para contribuir na remoção de calor.

Para o ajuste da **pressão de injeção**, uma recomendação prática é utilizar um procedimento conhecido como injeção progressiva (*short-shots*) [30, 87], que consiste em começar a injetar as peças com uma pressão muito reduzida e, a cada ciclo, ir aumentando a pressão (e a quantidade de material injetado) até que se obtenha o completo preenchimento da cavidade.

Contudo, o ajuste dos parâmetros não pode ser realizado considerando apenas a vida do inserto, sendo também importante considerar a qualidade da peça injetada. Isso depende de diversos fatores, tais como a forma geométrica da peça e as propriedades do material de injeção. O uso de sistemas CAE pode auxiliar na seleção dos parâmetros adequados.

4.DESCRICÃO DOS ESTUDOS DE CASO

4.1.ESCOPO DA PESQUISA

Visando atingir os objetivos propostos, foram realizados estudos de caso, onde insertos de resina termofixa, fabricados por estereolitografia, foram utilizados para a moldagem por injeção de alguns tipos de peças em diferentes materiais de produção (polipropileno, polietileno e cera para microfusão), como sumariza a Tabela 4.

TABELA 4 - Estudos de caso realizados neste trabalho

Estudo de caso	Tipo de peça Injetada	Material injetado no inserto	Quantidade de conjuntos ³ de insertos confeccionados
1	1	Plástico (polipropileno)	06
2	2	Plástico (polipropileno)	02
3	3	Plástico (PEAD)	01
4	4, 5 e 6	Cera para microfusão	03

Adicionalmente aos estudos de caso, foi realizado neste trabalho um experimento de moldagem de pós-metálicos por injeção, apresentado no Anexo C.

4.2.ESTUDO DE CASO 1

4.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O primeiro estudo de caso teve como objetivo específico avaliar o uso de uma liga de estanho como material de preenchimento da parte de trás dos insertos, comparando-o com a liga à base de bismuto, tradicionalmente utilizada na literatura, em termos de: quantidade de peças

produzidas (vida do inserto); e aspectos visuais, relacionados à qualidade da peça (por exemplo, rebarbas) e à maior ou menor facilidade de fazer o preenchimento (por exemplo, deformações causadas no inserto). Como a liga de estanho possui uma maior condutividade térmica, é esperado que a taxa de refrigeração do inserto seja maior e, conseqüentemente, sua vida aumente. A Tabela 5, a seguir, mostra uma descrição das principais características dos insertos confeccionados neste estudo de caso.

TABELA 5 - Descrição dos insertos confeccionados no estudo de caso 1

Identificação dos Conjuntos de insertos	Espessura de Casca (mm)	Material de preenchimento
Insertos #1	1,25 mm	Liga de estanho
Insertos #2	1,25 mm	Liga de estanho
Insertos #3	1,25 mm	Liga de estanho
Insertos #4	1,25 mm	Liga de estanho
Insertos #5	1,25 mm	Metspec-217
Insertos #6	1,25 mm	Liga de estanho e bismuto

4.2.2. DEFINIÇÃO DA PEÇA 01

Para o primeiro estudo de caso foi definida uma peça cuja forma geométrica é considerada relativamente simples, tanto do ponto de vista de fabricação do inserto quanto do processo de moldagem de injeção. Foram também considerados os seguintes critérios para a sua definição: capacidade da máquina injetora utilizada; limitações do porta-moldes disponível; e capacidade da máquina de estereolitografia utilizada (volume de trabalho de 250 x 250 x 250 mm). A peça definida é mostrada na Figura 43, tendo um diâmetro máximo de 50 mm e espessura de 4,0 mm.

³ Considera-se, neste trabalho, um conjunto sendo formado por um inserto-macho e um inserto-fêmea.

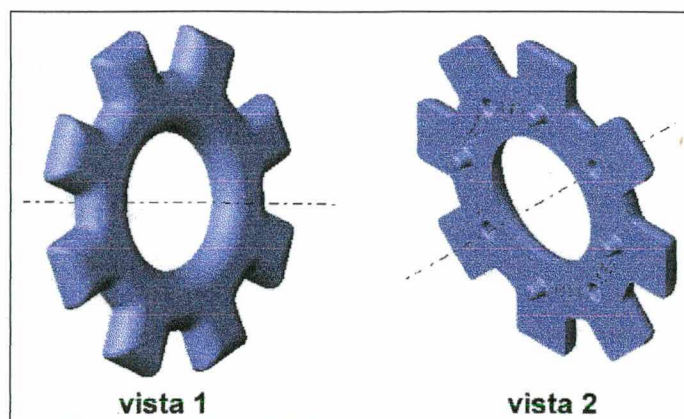


FIGURA 43 - Peça 01 (imagens do CAD)

4.2.3. PROJETO DOS INSERTOS

O projeto dos insertos de estereolitografia foi realizado visando adaptar-se as características do porta-moldes disponível, como área moldante de 130 x 260 mm e bucha de injeção disposta no centro do molde. Visando diminuir esta área para assim reduzir as dimensões e massa dos insertos e o tempo para fabricá-los, foram confeccionados postigos metálicos, para serem incorporados às placas porta-cavidades (lado fixo e lado móvel), como mostra esquematicamente a Figura 44. O uso desses postigos teve também a função de facilitar tanto a montagem quanto a desmontagem dos insertos.

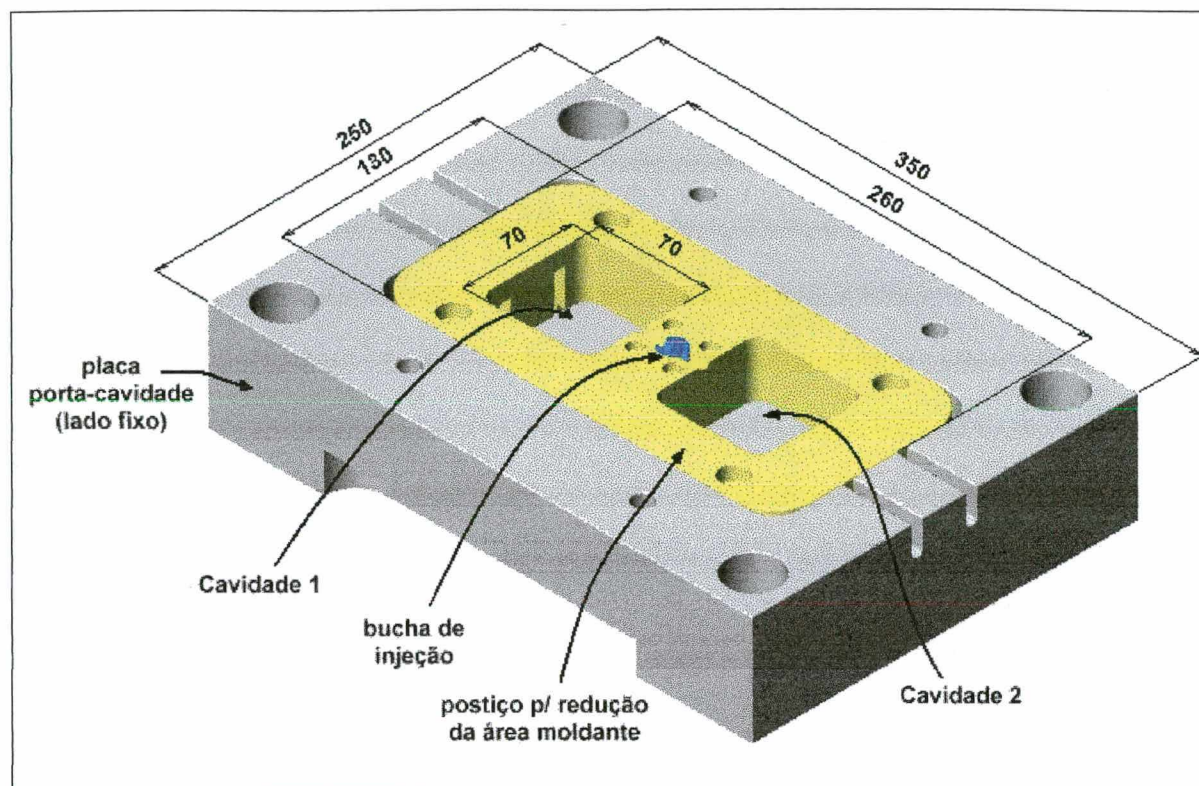


FIGURA 44 - Placa porta-cavidade (lado fixo) com postiço metálico

Não foi considerado o fator de contração do material plástico, haja visto que o mesmo não influi no objetivo deste estudo de caso. Como a forma geométrica da peça definida facilita sua extração, não foram incorporados ângulos de saída.

Cabe ressaltar que uma limitação, imposta pelo uso de um porta-moldes previamente utilizado para outra função, é percebida durante o projeto do sistema de alimentação. O que existe disponível, para a realização deste trabalho, tem a bucha de injeção localizada no centro, entre as duas cavidades, conforme apresentado na Figura 44. Neste estudo de caso, o posicionamento do canal de alimentação, assim como do ponto de injeção, foi realizado considerando-se esta limitação. Isto implicou que a injeção do material plástico precisou ser feita pela lateral da peça. Contudo, em função de suas características, isto pode resultar em linhas de

solda, principalmente no lado oposto ao ponto de injeção adotado, como mostra a simulação, realizada em CAE, com o uso do programa *CMOLD - QuickFill* (Figura 45).

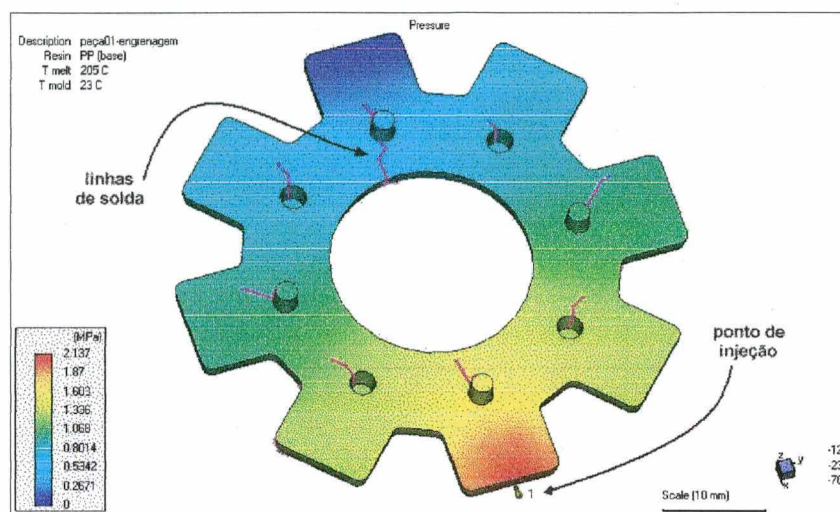


FIGURA 45 - Simulação da moldagem por injeção para a Peça 01⁴

No que se refere ao dimensionamento do ponto de injeção, adotou-se a forma de “meia lua” com raio de 3,0 mm, igual ao do canal de alimentação, visando reduzir os esforços nesta região, além de permitir uma velocidade de injeção mais baixa, o que é favorável à vida do inserto.

Devido principalmente às limitações da resina de estereolitografia utilizada, a técnica de refrigeração adotada foi a instalação de tubos de cobre, na parte de trás do inserto, antes da etapa de preenchimento.

Durante o projeto dos insertos, foi prevista a extração manual da peça. Não foi utilizado sistema de extração automático por não ser possível fazer as alterações necessárias no porta-

⁴ Utiliza-se, na simulação, os parâmetros (temperatura de injeção e material) a serem utilizados na injeção das peças, apresentados na Tabela 8.

moldes. Contudo, o sistema de extração do canal que fica no interior da bucha de injeção, já existente no porta-moldes utilizado, foi mantido.

A espessura de casca do inserto é um importante fator a ser considerado, pois influi na taxa de transferência de calor no molde. A espessura, utilizada neste estudo de caso, é de 1,25 mm, na mesma ordem da menor espessura utilizada por *Saurkar* [38], conforme apresentado no Capítulo anterior. Na parte de trás dos insertos foram incorporadas nervuras, visando aumentar a resistência da casca e evitar deformações, principalmente, durante o preenchimento com metais de baixo ponto de fusão. Na literatura utilizada, não encontrou-se recomendações para seu dimensionamento. Optou-se, então, neste estudo de caso, utilizar nervuras na forma de paredes verticais, com espessura de 2,0 mm e altura de 10,0 mm, distribuídas uniformemente na parte de trás da casca (ver Figura 23, Capítulo 3). A área projetada dessas nervuras representa cerca de 12% da área do inserto (70 x 70 mm).

O último passo da etapa de projeto e modelagem dos insertos no CAD é a geração dos arquivos STL. A resolução adotada para tal foi de 0,01 mm para o parâmetro *total quality deviation* e de 5,0° para o *angle tolerance*, do sistema *SolidWorks*.

4.2.4. FABRICAÇÃO DOS INSERTOS

A preparação para a fabricação inicia-se com a orientação espacial dos insertos a serem fabricados, no volume de trabalho disponível na máquina. Para isso, foram adotadas as recomendações apresentadas no Capítulo 3, onde a região moldante fica orientada para cima. Em seguida, realiza-se o projeto dos suportes para a fabricação, onde adota-se a geração automática, porém com a posterior modificações, feitas manualmente, como, por exemplo, a remoção dos suportes do tipo “cantoneiras” (conforme explicado no Capítulo 3) e adição de suportes em

regiões críticas ou não suficientemente apoiadas. A etapa subsequente foi definir os parâmetros para a fabricação, apresentados nas Tabelas 6 e 7. Isto foi realizado considerando-se a resina de estereolitografia disponível para a fabricação dos insertos, no caso a Ciba-SL-5170, cujas principais propriedades foram apresentadas na Tabela 1.

TABELA 6 - Parâmetros de construção do estilo ACES usados no estudo de caso 1

Parâmetro	Valor
Espessura de fatiamento (<i>layer thickness</i>)	0,15 mm
Tipo de preenchimento (<i>hatch type</i>)	Box
Espaçamento de preenchimento (<i>hatch spacing</i>)	0,10 mm
Tipo de “pele” (<i>skin type</i>)	X&Y
Espaçamento da “pele” (<i>skin fill spacing</i>)	0,10 mm
Mínimo ângulo de suporte (<i>minimum support angle</i>)	40°
Sobrecura da borda (<i>border overcure</i>)	0,18 mm
Sobrecura do preenchimento (<i>hatch overcure</i>)	-0,075 mm
<i>Up facing fill cure depth</i>	0,13 mm
<i>Down facing fill cure depth</i>	0,23 mm

Com a geração do arquivo de controle e sua posterior transferência para o computador da máquina de estereolitografia, a fabricação dos insertos, em forma de casca, pode ser executada.

TABELA 7 - Parâmetros de recobrimento usados no estudo de caso 1

Parâmetro	Regiões da cavidade(*)	Outras regiões
<i>Pre dip delay</i>	15 s	15 s
<i>Post dip delay</i>	1 s	1 s
<i>Z level wait</i>	35 s	25 s
<i>Z dip distance</i>	10,0 mm	6,35 mm
<i>Z dip velocity and accelaration</i>	0,2	0,2
<i>Number of sweeps</i>	3	1
<i>Sweep #1 period</i>	5 s	5 s
<i>Sweep #1 blade gap</i>	150%	140%
<i>Sweep #2 period</i>	8 s	-
<i>Sweep #2 blade gap</i>	125%	-
<i>Sweep #3 period</i>	10 s	-
<i>Sweep #3 blade gap</i>	125%	-

(*) Regiões dos insertos que possuem a característica de volume retido.

4.2.5. PREPARAÇÃO DOS INSERTOS

Após a fabricação, os insertos do estudo de caso 1 (Figura 32) passaram por uma etapa de pós-processamento, que envolveu:

- Remoção manual dos suportes;
- Banho manual em álcool isopropílico, por cerca de 1 hora; e
- Pós-cura, em câmara ultravioleta, durante 1 hora.

Procedimentos de acabamento superficial, como, por exemplo, lixamento e polimento, não são realizados neste estudo. Os insertos (macho e fêmea) foram então montados nos respectivos posições das placas porta-cavidades (Figura 37) e, em seguida, tubos de cobre para a refrigeração foram dobrados (com o auxílio de um gabarito para assegurar a forma desejada) e posicionados na parte de trás dos insertos (Figura 38), a uma distância axial de aproximadamente 15 mm da linha de partição do molde.

O próximo passo foi fazer o preenchimento da parte de trás dos insertos, de acordo com a descrição apresentada na Tabela 5. O preenchimento com a liga de estanho utilizada neste trabalho é mais complicado de ser realizado, em relação às ligas de bismuto, pois seu ponto de fusão é maior e possui um menor índice de fluidez quando no estado fundido. As dificuldades encontradas para fazer o preenchimento são apresentadas e discutidas no Capítulo 5.

Os insertos preenchidos passaram ainda por uma etapa de usinagem (por fresamento) da parte de trás, conforme apresentado na Figura 40, para nivelar a altura do material de preenchimento em relação à placa porta-cavidade. Em seguida, a montagem dos outros componentes do molde foi realizada (Figura 41).

4.2.6. INJEÇÃO DAS PEÇAS

Utilizou-se, neste estudo de caso, o procedimento de injeção progressiva, comentado no Capítulo 3. Os parâmetros finais do perfil de injeção, realizada em três estágios, são apresentados na Tabela 8. Para auxiliar na extração das peças, realizada manualmente, foi utilizado um agente desmoldante, à base de silicone, normalmente a cada 4 ciclos.

TABELA 8 - Parâmetros de injeção usados no estudo de caso 01

Parâmetro	Inserto #1	Inserto #2	Inserto #3	Inserto #4	Inserto #5	Inserto #6
Temperatura no bico de injeção	205 °C	205 °C	205 °C	205 °C	205 °C	205 °C
Pressão de injeção no 1º estágio	100 bar	100 bar	204 bar	204 bar	204 bar	204 bar
Velocidade de injeção no 1º estágio	15 cm ³ /s	15 cm ³ /s	15 cm ³ /s	15 cm ³ /s	15 cm ³ /s	15 cm ³ /s
Pressão de injeção no 2º estágio	100 bar	100 bar	150 bar	150 bar	150 bar	150 bar
Velocidade de injeção no 2º estágio	7 cm ³ /s	7 cm ³ /s	20 cm ³ /s	20 cm ³ /s	20 cm ³ /s	20 cm ³ /s
Pressão de injeção no 3º estágio	105 bar	105 bar	150 bar	150 bar	150 bar	150 bar
Velocidade de injeção no 3º estágio	8 cm ³ /s	8 cm ³ /s	15 cm ³ /s	15 cm ³ /s	15 cm ³ /s	15 cm ³ /s
Pressão de recalque	75 bar a 1 s 60 bar a 15s	75 bar a 1 s 60 bar a 15s	120 bar	120 bar	120 bar	120 bar
Tempo de recalque	16 s	16 s	10 s	10 s	10 s	10 s
Tempo de refrigeração	60 s	60 s	50 s	50 s	50 s	50 s
Tempo de molde aberto	20 s	20 s	10 s	10 s	10 s	10 s
Tempo médio de ciclo	120 s	120 s	90 s	90 s	90 s	90 s
Força de fechamento	10 ton.	10 ton.	40 ton.	40 ton.	40 ton.	40 ton.
Vazão de líquido refrigerante (água)	11,2 L/s	5,6 L/s (*)	11,2 L/s	11,2 L/s	11,2 L/s	11,2 L/s
Temperatura de entrada da água	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C

(*) Refrigeração apenas no inserto-macho (placa móvel)

4.3. ESTUDO DE CASO 2

4.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este estudo de caso possui também o objetivo de avaliar o uso de liga de estanho como material de preenchimento, todavia, para a produção de uma típica peça de plástico injetada, com uso de insertos macho e fêmea fabricados por estereolitografia. O uso de liga de estanho foi

comparado com o material à base de bismuto, em termos de: quantidade de peças produzidas (vida do inserto); temperatura dos insertos durante a injeção; e aspectos visuais, relacionados à qualidade da peça. A Tabela 9 descreve as principais características dos insertos confeccionados neste estudo.

TABELA 9 - Descrição dos insertos confeccionados no estudo de caso 02

Identificação dos conjuntos de insertos	Espessura de casca (mm)	Material de preenchimento
Insertos #7	1,50 mm	Liga de estanho
Insertos #8	1,50 mm	Metspec-217

4.3.2. DEFINIÇÃO DA PEÇA 02

No segundo estudo de caso, foi selecionada a peça de plástico mostrada na Figura 46, que se trata de uma pequena tampa, com base circular (diâmetro externo de 50 mm) e espessura de parede uniforme (1,35 mm), cuja injeção requer que haja movimentos relativos entre as paredes da peça injetada e das cavidades do inserto. Da mesma forma que no estudo anterior, também foram consideradas as limitações do porta-moldes e máquina injetora disponíveis.

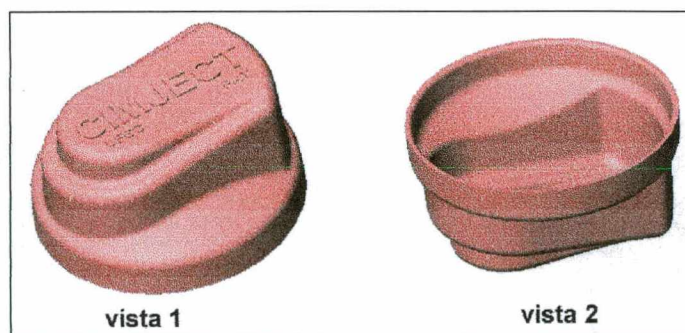


FIGURA 46 - Peça 02 (imagens do CAD)

4.3.3. PROJETO DOS INSERTOS

As dimensões externas dos insertos (macho e fêmea) foram de 70 x 70 mm, em função de ser a área moldante disponível do porta-moldes utilizado (Figura 44). No caso das dimensões das cavidades, estas foram estabelecidas em relação à peça, porém sem considerar o fator de contração. Um ângulo de saída de 2 graus foi incorporado tanto no inserto-macho (lado móvel) quanto no inserto-fêmea (lado fixo).

Conforme já explicado no estudo anterior, o porta-moldes utilizado é do tipo duas-placas e possui duas cavidades, o que define, neste caso, que o ponto de injeção seja na lateral da peça. Isto seguramente resultar em linhas de solda, principalmente no lado oposto ao ponto de injeção (Figura 47), uma vez que a espessura de toda a peça é constante. Dimensionou-se o ponto na forma de “leque”, com largura de 10 mm e altura igual à espessura da peça.

Em função das características da peça, é comum, após a injeção, a mesma aderir-se ao inserto-macho, devido à contração do plástico ao solidificar-se. Contudo, neste estudo também não foi utilizado sistema de extração automático. Foi mantido apenas o sistema de extração do material que permanece no interior da bucha, já existente no porta-moldes disponível.

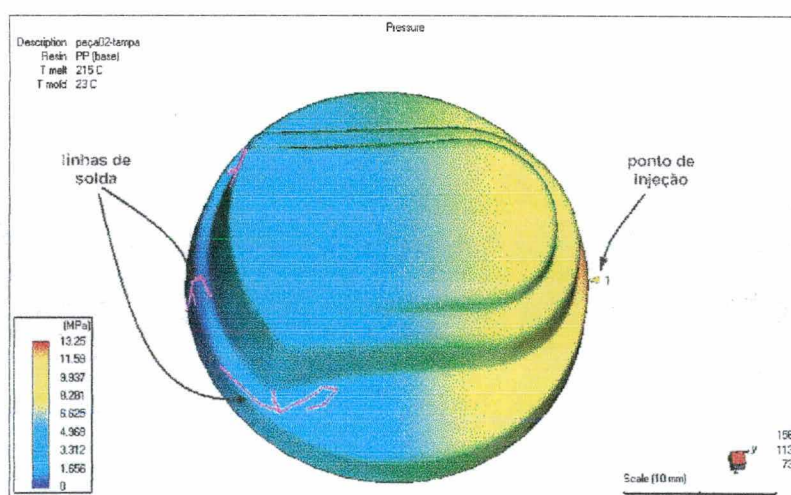


FIGURA 47 - Simulação da moldagem por injeção para a Peça 02

A espessura de casca do inserto, utilizada neste estudo de caso, é de 1,50 mm, como apresentado na Tabela 9. Da mesma forma que no primeiro estudo de caso, na parte de trás da casca, foram incorporadas nervuras para aumentar sua resistência, distribuídas uniformemente (Figura 48), e adotada a técnica de refrigeração através da instalação de tubos de cobre. Na geração dos arquivos “STL”, após a modelagem em CAD, a resolução adotada foi a mesma utilizada no estudo de caso 01.

4.3.4. FABRICAÇÃO DOS INSERTOS

Na orientação espacial dos insertos, para a fabricação, procurou-se deixar a região moldante orientada para cima, conforme apresentado na Figura 29(a) do Capítulo 3. No projeto dos suportes, foi adotada a geração automática com posterior alterações, como a remoção das “cantoneiras” e adição de suportes em regiões críticas ou não suportadas suficientemente. Foi utilizado o estilo de construção *ACES* (mesmos parâmetros do estudo anterior, apresentados na Tabela 6), baseando-se na resina disponível para a fabricação (Ciba-SL-5170). Os parâmetros de recobrimento são apresentados na Tabela 10.

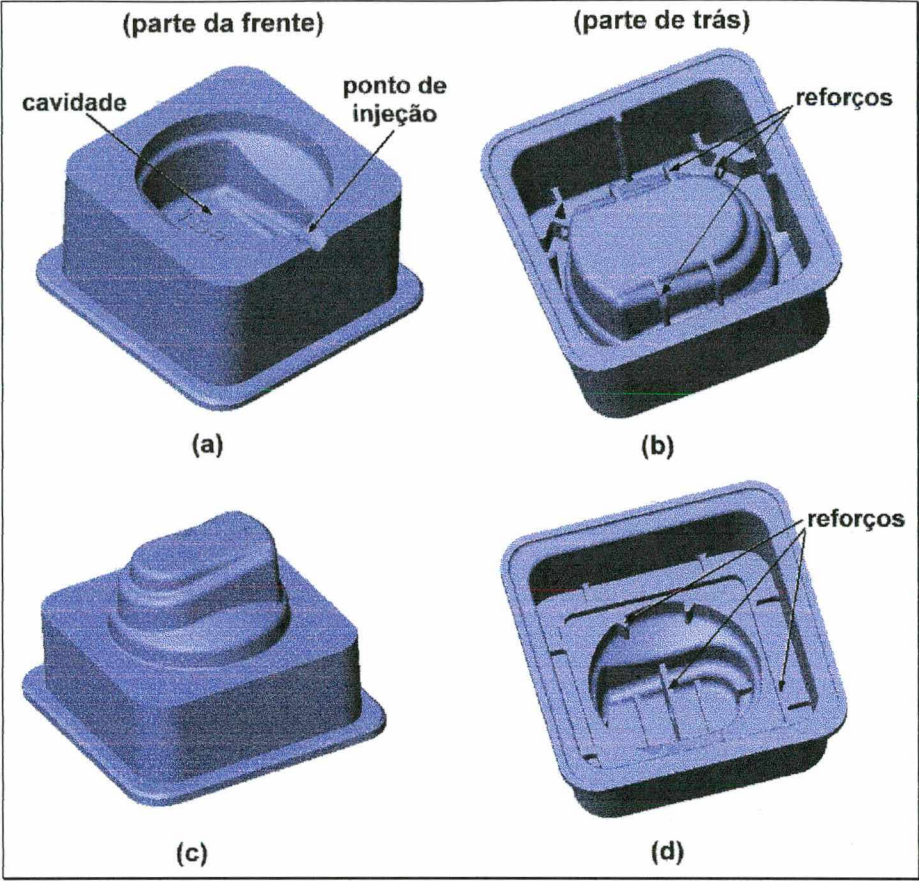


FIGURA 48 - Insertos-fêmea (a, b) e macho (c, d) do estudo de caso 2

TABELA 10 -Parâmetros de recobrimento usados no estudo de caso 2

Parâmetro	Regiões da cavidade	Outras regiões
Pre dip delay	15 s	15 s
Post dip delay	1 s	1 s
Z level wait	40 s	25 s
Z dip distance	10,0 mm	6,35 mm
Z dip velocity and accelaration	0,2	0,2
Number of sweeps	3	1
Sweep #1 period	3 s	5 s
Sweep #1 blade gap	150%	140%
Sweep #2 period	3 s	-
Sweep #2 blade gap	140%	-
Sweep #3 period	6 s	-
Sweep #3 blade gap	140%	-

4.3.5. PREPARAÇÃO DOS INSERTOS

Neste estudo, os procedimentos da etapa de pós-processamento (remoção de suportes, limpeza e pós-cura) foram os mesmos usados no estudo de caso 01. Contudo, foi realizado acabamento superficial, nas regiões moldantes dos insertos, através de lixamento manual, com redução progressiva da granulometria das lixas utilizadas (220, 400 e 600).

Após a montagem dos insertos nos respectivos posições das placas porta-cavidades, um termopar foi colocado nas mesmas posições nos insertos-macho #7 e #8 (Figura 49), a serem preenchidos, respectivamente, com liga de estanho e Metspec-217, conforme apresentado na Tabela 9, visando assegurar que, após o preenchimento, o termopar ficasse alojado na interface entre a casca de resina e o metal de baixo ponto de fusão. Um sistema de aquisição de dados foi utilizado para registrar a variação de temperatura nestes insertos, ao longo do tempo, durante a moldagem por injeção. Informações extras sobre o uso deste sistema para a medição de temperatura encontram-se no **Anexo A**.

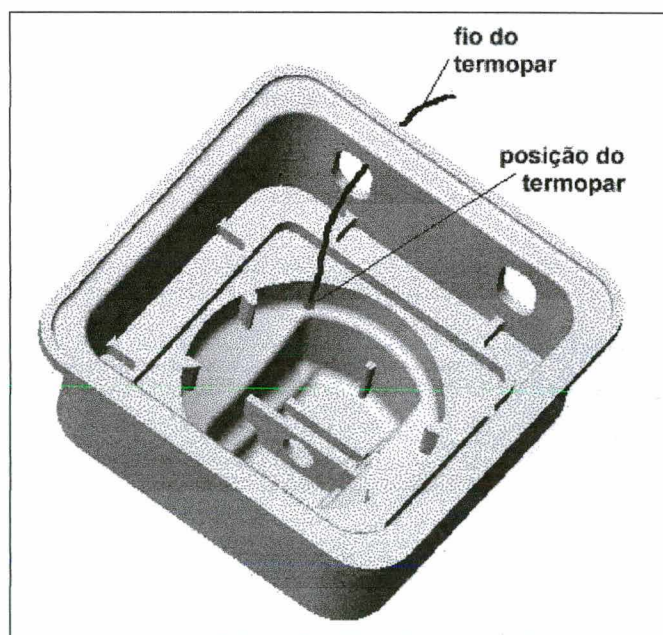


FIGURA 49 - Localização esquemática do termopar no inserto-macho

Antes de fazer o preenchimento, foi também posicionado, na parte de trás da casca, tubos de cobre para a refrigeração, previamente conformados na forma desejada. Nos insertos-fêmea, os tubos foram conformados para permanecerem a uma distância de cerca de 10 mm da região moldante, enquanto que, nos insertos-macho, a distância foi consideravelmente maior, devido ao espaço insuficiente para o posicionamento dos tubos no seu interior. Completado o preenchimento, os insertos foram usinados na parte de trás e, posteriormente, montados no molde.

4.3.6. INJEÇÃO DAS PEÇAS

Os parâmetros finais do perfil de injeção, para o estudo de caso 02, realizada em três estágios, são apresentados na Tabela 11. Foi utilizado agente desmoldante, à base de silicone, a cada 4 ciclos.

TABELA 11 -Parâmetros de injeção usados no estudo de caso 2

Parâmetro	Inserto #7	Inserto #8
Temperatura no bico de injeção	215 °C	215 °C
Pressão de injeção no 1º estágio	200 bar	200 bar
Velocidade de injeção no 1º estágio	140 cm ³ /s	140 cm ³ /s
Pressão de injeção no 2º estágio	230 bar	230 bar
Velocidade de injeção no 2º estágio	135 cm ³ /s	135 cm ³ /s
Pressão de injeção no 3º estágio	250 bar	250 bar
Velocidade de injeção no 3º estágio	125 cm ³ /s	125 cm ³ /s
Pressão de recalque	125 bar a 4,5 s	125 bar a 4,5 s
	150 bar a 0,1 s	150 bar a 0,1 s
Tempo de recalque	4,6 s	4,6 s
Tempo de refrigeração	30 s	30 s
Tempo de molde aberto	60 s	60 s
Tempo médio de ciclo	102 s	102 s
Força de fechamento	40 ton.	40 ton.
Vazão de líquido refrigerante (água)	11,2 L/s	11,2 L/s
Temperatura de entrada da água	20 °C	20 °C

4.4. ESTUDO DE CASO 3

4.4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este estudo de caso é parte integrante do projeto de cooperação realizado entre a empresa **Santana Industrial de Plástico Ltda - Injeplast** (Maringá, PR) e o **Laboratório CIMJECT – UFSC**, para o desenvolvimento de um produto de plástico injetado (separador de cabos elétricos).

No caso específico deste estudo de caso, o objetivo foi mostrar que insertos, produzidos pelo processo *Direct AIM*, poderiam ser utilizados para a produção de um pequeno lote protótipos funcionais (cerca de 10) de uma peça com um maior grau de complexidade geométrica, no material final de produção, assim como identificar possíveis limitações impostas pela maior complexidade.

4.4.2. DEFINIÇÃO DA PEÇA 03

A peça selecionada para este estudo foi um separador de cabos elétricos, mostrada na Figura 50. A peça possui um comprimento máximo da ordem de 500 mm, paredes de espessuras não uniformes e regiões com seções circulares interrompidas por aletas de espessuras com dimensões pequenas e profundas.

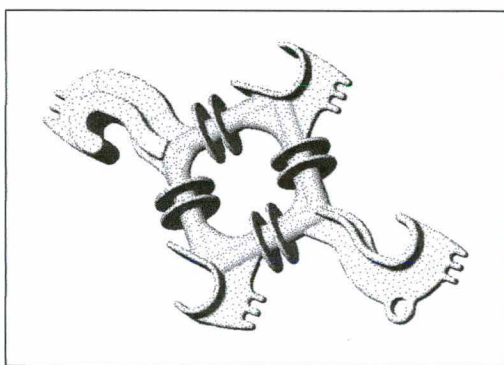


FIGURA 50 - Peça 03 (vista isométrica no CAD)

Por limitações da máquina injetora e do porta-moldes disponível, a peça foi produzida em uma escala 2,5:1. Nesta escala, as menores espessuras de parede são cerca de 1,5 mm, enquanto que as maiores são da ordem de 14 mm.

4.4.3. PROJETO DOS INSERTOS

A peça, em função de suas características, pode ser produzida por um molde de duas placas, com dois insertos-fêmea, sem a necessidade de macho e gavetas. São consideradas as limitações do porta-moldes disponível, cuja área moldante, da placa porta-cavidades (sem o uso de postigos), é de 130 x 260 mm, conforme foi apresentado na Figura 44.

Para auxiliar na extração, um ângulo de saída de 2 graus foi incorporado aos insertos. No entanto, não foi utilizado sistema de extração automático da peça, conforme já explanado nos estudos anteriores, sendo utilizado somente o sistema de extração do material que permanece no interior da bucha.

De acordo com o *layout* de cavidade adotado, a bucha de injeção fica no centro geométrico da peça (Figura 51). No que se refere ao dimensionamento do sistema de alimentação, no inserto, foram usados dois pontos de injeção, na forma de “meia lua”, com raio de 3,0 mm. Cada ponto é formado pela redução contínua e uniforme da seção transversal do canal de alimentação, cujo comprimento é de aproximadamente 10 mm a partir da bucha de injeção.

Os insertos deste estudo foram projetados também em forma de casca, com espessura de 2,0 mm. Contudo, algumas regiões tiveram espessuras maiores, uma vez que o sistema CAD utilizado não permitiu, em função da maior complexidade geométrica deste caso, usar o recurso conhecido por *shell* (transformação automática de um objeto sólido em um oco, a partir uma determinada espessura de casca que foi definida).

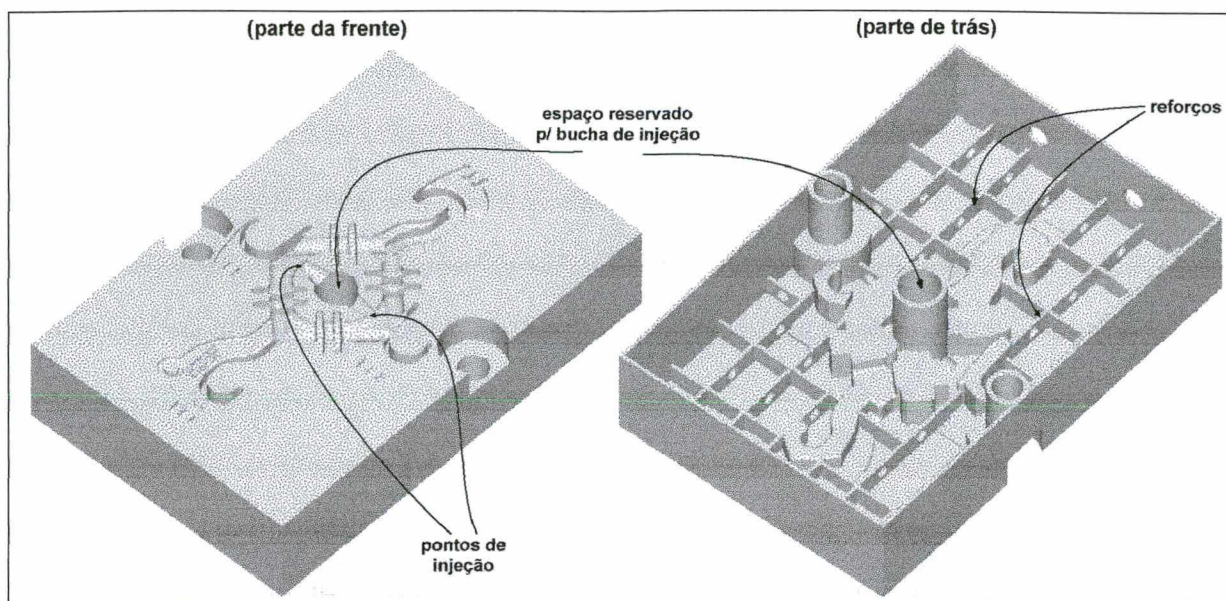


FIGURA 51 - Inserto do estudo de caso 3 (lado fixo, imagens do CAD)

Na parte de trás dos insertos, foram igualmente incorporadas nervuras para aumentar sua resistência, na forma de paredes verticais, com altura de 10 mm e espessura de 2,0 mm, distribuídas o mais uniforme possível. Essas nervuras representam cerca de 10% da área projetada do inserto. A técnica de refrigeração foi a mesma dos estudos anteriores. Na geração dos arquivos “STL”, a resolução usada foi de 0,01 mm (*total quality deviation*) e 5,0° (*angle tolerance*).

4.4.4. FABRICAÇÃO DOS INSERTOS

Os insertos foram fabricados de tal forma que suas regiões moldantes ficassem orientadas para cima. Foi adotada a geração automática de suportes, porém com posterior modificações (remoção de “cantoneiras” e adição de suportes em regiões críticas). Os parâmetros do estilo de construção *ACES* são os mesmos utilizados no estudo de caso 1 (Tabela 6), enquanto que os de recobrimento são os do estudo 2 (Tabela 10). A Figura 52 apresenta uma fotografia dos insertos de resina fabricados neste estudo de caso.



FIGURA 52 - Insertos do estudo de caso 3

4.4.5. PREPARAÇÃO DOS INSERTOS

Os procedimentos de remoção de suportes, limpeza e pós-cura foram os mesmos utilizados no estudo de caso 01. Contudo, foi dado acabamento superficial, através de lixamento manual, nas regiões moldantes dos insertos, com especial atenção nas paredes verticais, na direção de extração da peça. As lixas utilizadas possuem granulometria 220, 400 e 600.

Antes da montagem dos insertos nas respectivas placas porta-cavidade, tubos de cobre foram dobrados e posicionados na parte de trás da casca. O preenchimento, neste estudo, foi feito de forma composta, onde as primeiras camadas, próximas da casca de resina (totalizando cerca de 10 mm de espessura), foram preenchidas com Metspec-217, enquanto que, nas camadas subseqüentes, com liga de estanho. A Figura 53 mostra os dois insertos durante esta etapa. Os motivos de se adotar este preenchimento composto são discutidos do Capítulo 5.

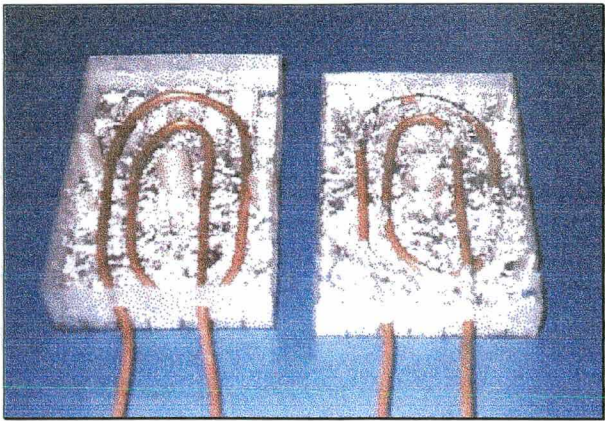


FIGURA 53 - Insertos do estudo de caso 3 durante o preenchimento da parte de trás

4.4.6. INJEÇÃO DAS PEÇAS

Os principais parâmetros de injeção, após o ajuste das condições adequadas, são apresentados na Tabela 12. Para facilitar a extração da peça, neste estudo, foi utilizado agente desmoldante, à base de silicone, a cada dois ciclos.

TABELA 12 -Parâmetros de injeção usados no estudo de caso 3

Parâmetro	Valor
Temperatura no bico de injeção	215 °C
Pressão de injeção no 1º estágio	280 bar
Velocidade de injeção no 1º estágio	80 cm³/s
Pressão de injeção no 2º estágio	280 bar
Velocidade de injeção no 2º estágio	80 cm³/s
Pressão de injeção no 3º estágio	280 bar
Velocidade de injeção no 3º estágio	80 cm³/s
Pressão de recalque	125 bar a 4,5 s 150 bar a 0,1 s
Tempo de recalque	4,6 s
Tempo de refrigeração	80 s
Tempo de molde aberto	135 s
Tempo médio de ciclo	240 s
Força de fechamento	50 ton.
Vazão de líquido refrigerante (água)	11,2 L/s
Temperatura de entrada da água	20 °C

4.5. ESTUDO DE CASO 4

4.5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de insertos fabricados por estereolitografia, com a presença de movimentos relativos entre paredes de resina, na produção de peças de cera para microfusão. Foi procurado investigar possíveis alterações de desvios dimensionais entre as principais etapas de confecção dos insertos, bem como comparar os insertos de resina com os fabricados em aço, tradicionalmente utilizados para a produção de peças de cera, em termos de: incerteza dimensional de peças de cera produzidas; tempo de ciclo de moldagem por injeção; e tempo de fabricação dos insertos.

4.5.2. DEFINIÇÃO DAS PEÇAS 04, 05 E 06

Neste estudo de caso, foram selecionadas três peças típicas de microfusão, com formas geométricas semelhantes, como mostra a Figura 54. Encontravam-se em produção, em insertos de aço, na empresa **PreciCast – Fundição de Precisão** (São José, SC), que manteve uma parceria com **Laboratório CIMJECT – UFSC**.



FIGURA 54 - Peças 04, 05 e 06 (vistas isométricas no CAD)

Os fatores que levaram a seleção dessas peças foram:

- Serem representativas dentro do tipo de peças que podem ser fabricadas por microfusão, além de já estarem em produção, o que torna desnecessário a fabricação de insertos de aço, neste trabalho, para a realização das comparações desejadas;
- Ter disponível um porta-moldes que permite a fixação de insertos de estereolitografia, para injeção de cera, na empresa **Precicast**, local onde os ensaios foram realizados.

4.5.3. PROJETO DOS INSERTOS

Para cada uma das peças definidas, um conjunto de insertos de estereolitografia foi preparado. O primeiro conjunto, para Peça 04, é formado por três insertos: duas fêmeas e um macho móvel, como mostra a Figura 55. Enquanto o segundo é composto por quatro: duas fêmeas, um macho também móvel e um postigo (Figura 56). Para a terceira peça, é utilizado apenas um inserto de resina (inserto-macho), que funciona como um postigo móvel incorporado aos insertos de aço do molde (Figura 57).

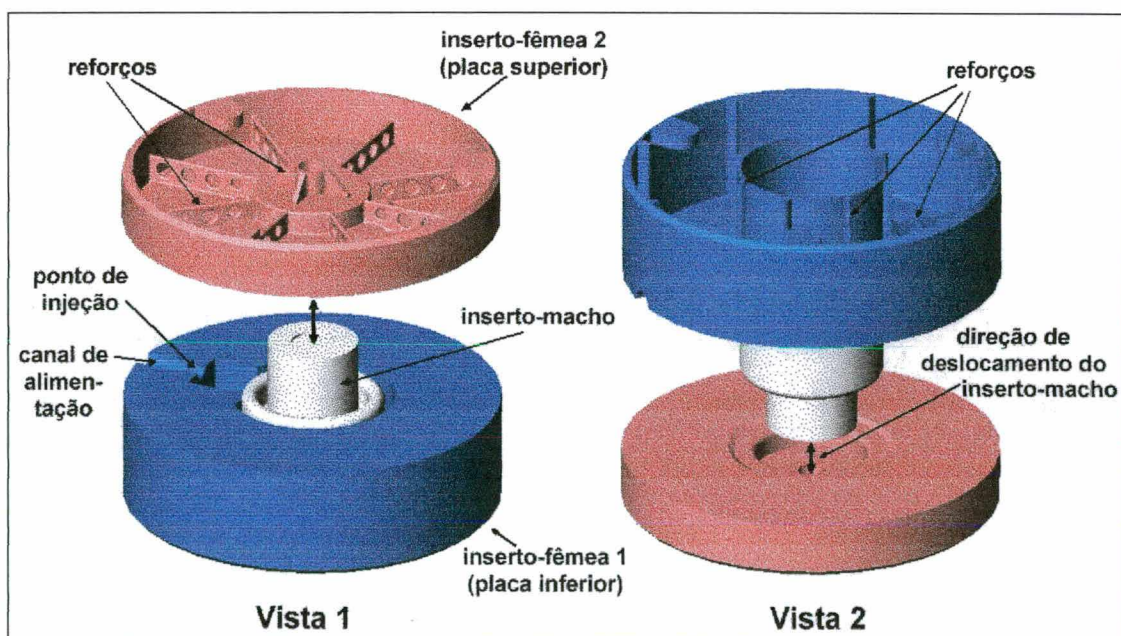


FIGURA 55 - Insertos do estudo de caso 04 (para Peça 04)

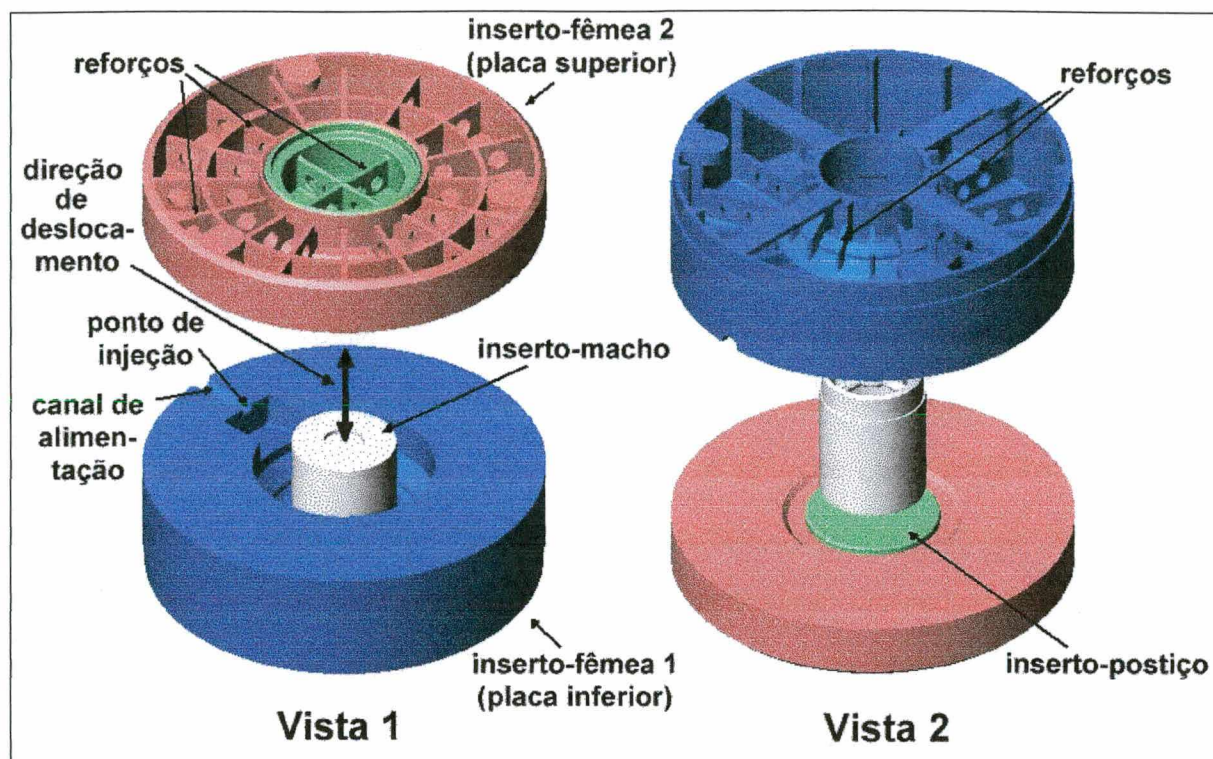


FIGURA 56 - Insertos do estudo de caso 04 (para Peça 05)

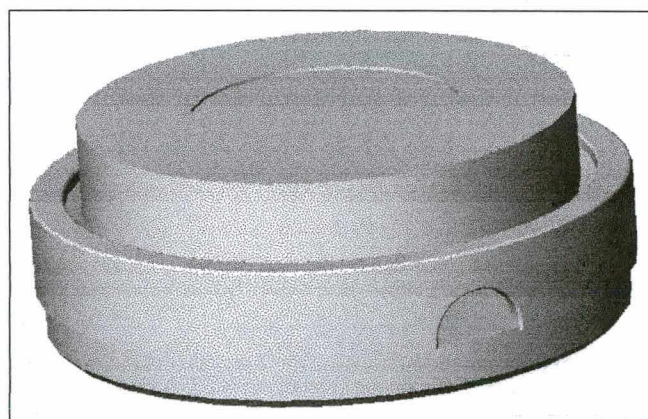


FIGURA 57 - Inserto do estudo de caso 04 (para Peça 06)

No projeto dos insertos de estereolitografia, foram adotadas as mesmas características dos de aço, já previamente projetados, fabricados e em uso na empresa, no que se refere:

- Ao dimensionamento da cavidade, considerando o fator de contração e a não incorporação de ângulos de saída;
- Ao sistema de alimentação (canal e ponto de injeção na forma de “meia lua”, com raio de 4,0 e 2,0 mm, respectivamente); e
- Ao sistema de extração, que é feito através do deslocamento do inserto-macho no interior da cavidade do inserto-fêmea 1, da placa inferior, conforme mostram as Figuras 55 e 56. Dessa forma, há movimentos relativos entre paredes dos insertos de resina.

Devido às limitações do porta-moldes disponível, no caso o utilizado para injeção de cera, pertencente à empresa **Precicast**, não foi possível utilizar sistema de refrigeração, tanto nos insertos de estereolitografia quanto nos de aço. A única refrigeração foi a da placa da máquina injetora (para cera), utilizada para fixar o porta-moldes. A Tabela 13 apresenta outros parâmetros de projeto, utilizados neste estudo de caso.

TABELA 13 -Parâmetros de construção dos insertos do estudo de caso 04

Parâmetro	Primeiro conjunto (para Peça 04)	Segundo conjunto (para Peça 05)	Terceiro conjunto (para Peça 06)
Espessura de casca (mm)	1,50	2,0	2,0
Geração do “STL”	0,23 mm (total quality deviation) 10,0° (angle tolerance)	0,01 mm (total quality deviation) 5,0° (angle tolerance)	0,01 mm (total quality deviation) 5,0° (angle tolerance)

4.5.4. FABRICAÇÃO DOS INSERTOS

Os insertos foram fabricados de tal forma que suas regiões moldantes também fiquem orientadas para cima. Adotou-se a geração automática de suportes, porém com posterior alterações (remoção de “cantoneiras” e adição de suportes em regiões críticas). Os parâmetros do

estilo de construção foram os mesmos utilizados no estudo de caso 1 (Tabela 6). Já os de recobrimento foram os usados no segundo estudo (Tabela 10).

4.5.5. PREPARAÇÃO DOS INSERTOS

Os procedimentos da etapa de pós-processamento foram os mesmos utilizados no estudo de caso 01, no que se refere à remoção de suportes, limpeza e pós-cura. No entanto, atenção especial foi dada no acabamento, em relação aos insertos para injeção de plástico (polipropileno e polietileno), procurando eliminar os “degraus de escada” (elevada rugosidade superficial), principalmente nas paredes verticais das regiões moldantes. Tal procedimento teve por objetivo auxiliar a extração, que é crítica nas peças de cera para microfusão, pois podem quebrar-se durante esta etapa, em função da fragilidade deste material. Neste estudo, o acabamento foi feito através de lixamento manual, com redução progressiva da granulometria das lixas utilizadas (220, 400 e 600), seguido de polimento com pasta abrasiva.

Como não foi possível utilizar refrigeração, conforme comentado anteriormente, não se fez a adição de tubos de cobre na parte de trás da casca. Seu preenchimento foi realizado de forma composta, como no estudo de caso 03. Porém, as primeiras camadas foram preenchidas com uma liga composta de estanho (aproximadamente 70% em volume) e bismuto (30%), que possui ponto de fusão menor (em relação ao estanho puro), o que facilita o preenchimento. Contudo, a condutividade térmica diminui. Nas camadas subseqüentes, foi utilizado somente liga de estanho. Completado o preenchimento, os insertos foram, então, usinados na parte de trás.

Para cada uma das peças definidas neste estudo, foi utilizado um porta-moldes de duas cavidades, com exceção da peça 03, onde foi utilizado um porta-moldes de uma cavidade. A

primeira cavidade é composta pelos insertos de estereolitografia e a segunda pelos de aço-1045, já previamente fabricados, como mostra a Figura 58, no caso para a injeção das Peças 04.

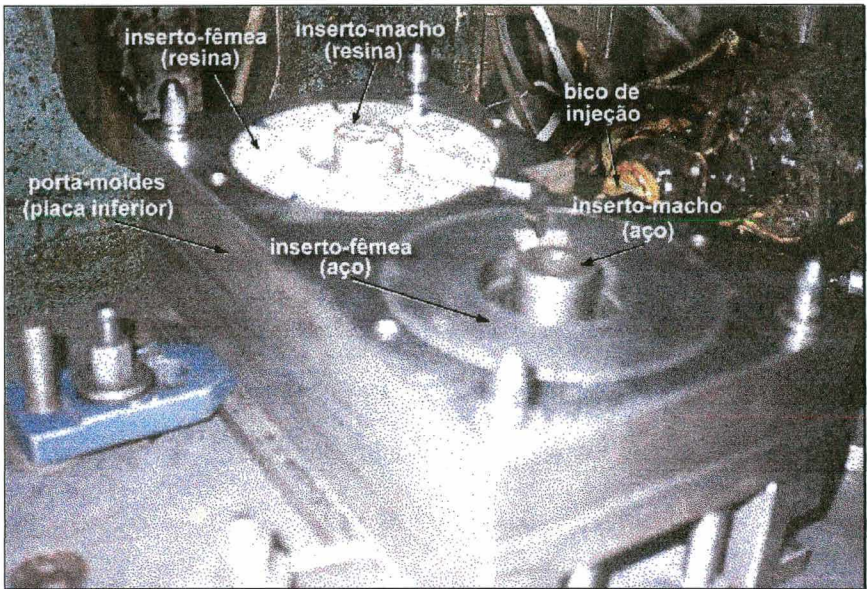


FIGURA 58 - Molde para injeção de cera

4.5.6. INJEÇÃO DAS PEÇAS

Por ser um molde de duas cavidades, os mesmos parâmetros de injeção são utilizados tanto para o inserto de resina quanto para o de aço, como mostra a Tabela 14. Os ensaios foram realizados na **Precicast**, contudo, não foram conduzidos extensivamente até o fim de vida dos insertos, por motivos relacionados à interrupção da produção da empresa. A cada ciclo de injeção, foi utilizado agente desmoldante, à base de silicone, para também auxiliar na extração da peça.

TABELA 14 -Parâmetros de injeção de cera para o estudo de caso 04

Parâmetro de injeção	Peça 04	Peça 05	Peça 06
Temperatura	57 °C	57 °C	58 °C
Pressão	2 bar	2 bar	3 bar

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1.ESTUDO DE CASO 01

Nesta primeira fase experimental do trabalho, pequenos lotes de peças de plástico foram produzidas (Figura 59), pelo processo de moldagem por injeção, com uso de seis conjuntos de insertos de resina termofixa confeccionados pelo processo de estereolitografia. A seguir serão apresentados os principais resultados obtidos neste estudo de caso.

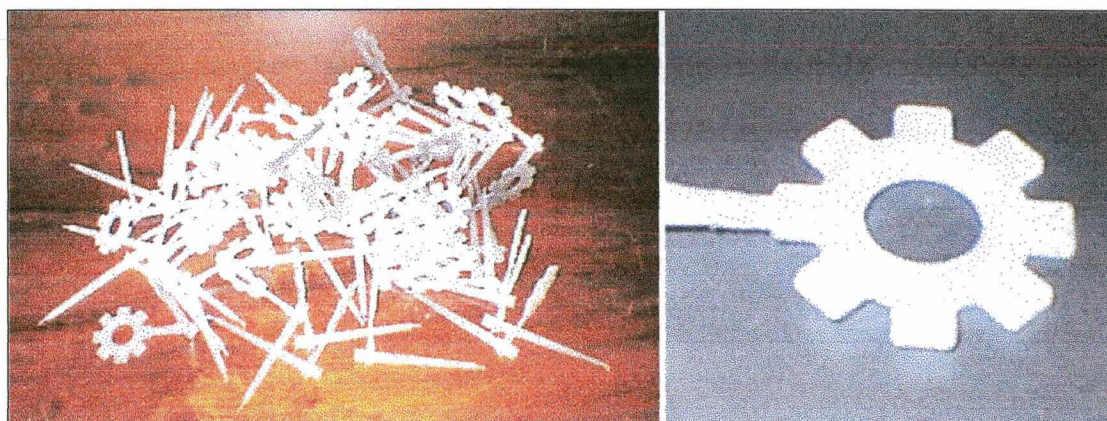


FIGURA 59 - Amostra de peças injetadas (estudo de caso 1)

5.1.1. TEMPO DE FABRICAÇÃO

Antes de serem fabricados, um requisito do processo de estereolitografia é que os insertos sejam modelados em CAD tridimensional. Para o conjunto de insertos (macho e fêmea) deste primeiro estudo de caso, consumiu-se 20 horas de modelagem. Porém, é importante salientar que este é um valor aproximado, pois o tempo despendido nesta etapa pode variar em função dos recursos disponíveis do sistema CAD utilizado, no caso o *SolidWorks*, e da capacidade/experiência do operador.

O tempo de fabricação, na máquina de estereolitografia, foi de 15 horas, o que pode ser considerado rápido, em relação aos processos tradicionais, apesar de ter sido utilizado um dos

equipamentos mais lentos disponíveis no mercado, no caso uma SLA-250/30. Este tempo ainda pode ser reduzido utilizando-se: uma máquina mais veloz (laser de maior capacidade, tanto no que se refere à potência quanto ao controle do diâmetro do feixe); resinas mais rápidas; e/ou confeccionando simultaneamente mais de um conjunto de insertos.

Em função do tempo de fabricação (na estereolitografia) ser normalmente independente da forma geométrica, o que também ocorre em outros processos de fabricação por camadas, o tempo apresentado anteriormente pode ser utilizado como referência para confecção de outros insertos, desde que possuam dimensões externas e volumes similares.

Concluída a construção na máquina os insertos, deste estudo de caso, passaram por uma etapa de preparação, que consumiu cerca de 3 horas em remoção de suportes, limpeza e pós-cura. Não foram realizados procedimentos de acabamento superficial (para redução da rugosidade da região moldante) através da remoção dos “degraus de escada”, pelo fato da forma geométrica da peça ser favorável à extração, conforme já comentado.

A etapa de preenchimento da parte traseira dos insertos, realizada manualmente, consome um tempo considerável, seja utilizando-se composto de resina epoxi e alumínio ou ligas metálicas de baixo ponto de fusão. Além disso, podem ainda deformar ou, em alguns casos, destruir completamente o inserto antes mesmo da moldagem por injeção, conforme será apresentado mais adiante. Neste estudo de caso, o preenchimento de um conjunto de insertos, seja utilizando liga de estanho, bismuto ou *Metspec*, consumiu 8 horas.

Após serem preenchidos, os insertos foram usinados pela parte de trás, para nivelar o material de preenchimento, consumindo-se horas para cada conjunto. Isso porque não foi utilizada uma taxa maior de remoção de material, durante o fresamento, pois isto poderia aumentar significativamente a temperatura e assim afetar as propriedades da resina epoxi. Em seguida todo o molde foi montado e a máquina injetora ajustada, despendendo-se 3 horas. A Figura 60 apresenta, graficamente, os tempos de fabricação dos insertos do primeiro estudo de

caso. Pelo fato de tempo e custo estarem, em geral, diretamente relacionados, a Figura 60 pode ser utilizada também para se ter uma estimativa do custo dos inserts.

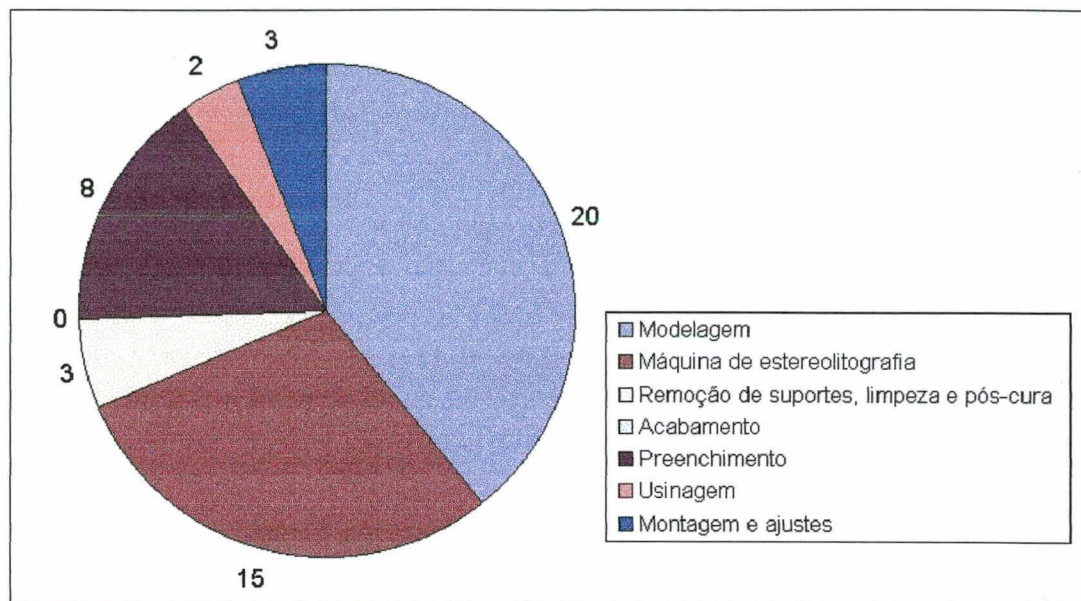


FIGURA 60 - Tempo de confecção, em horas, de um conjunto de inserts (estudo de caso 01)

5.1.2. PREENCHIMENTO COM METAIS DE BAIXO PONTO DE FUSÃO

No inserto de estereolitografia, é essencial remover o calor, proveniente do material plástico injetado, da forma mais rápida possível, conforme já comentado no Capítulo 3. A utilização de material de preenchimento com elevada condutividade térmica, bem como uma espessura de casca do inserto menor que 2 mm, contribuem para aumentar a taxa de transferência de calor.

No entanto, os materiais que possuem elevada condutividade térmica são normalmente metais, o que requer, para fazer o preenchimento, que sejam aquecidos acima do ponto de fusão, tornando-se uma massa líquida que é vazada na parte de traseira do inserto.

Porém, por estarem no estado fundido (aquecido), elevam a temperatura da casca do inserto de resina, podendo alterar suas propriedades. Este problema é agravado pelo fato que, os

metais que possuem boa condutividade térmica, possuem também ponto de fusão elevado, acima da temperatura de transição vítrea da resina. O material à base de estanho, por exemplo, possui maior condutividade térmica do que a liga *Metspec*, todavia seu ponto de fusão é também maior, fato este que é desfavorável ao seu uso.

Durante o preenchimento, em função do aumento de temperatura da casca do inserto, sua resistência mecânica diminui consideravelmente, sendo comum deformar-se até pelo próprio peso do metal fundido, caso esta etapa não seja realizada de forma adequada. Isto leva a inutilizar o inserto antes mesmo da moldagem. A deformação pode ser de tal ordem de grandeza que chega a romper a casca do inserto, como mostra a Figura 61.

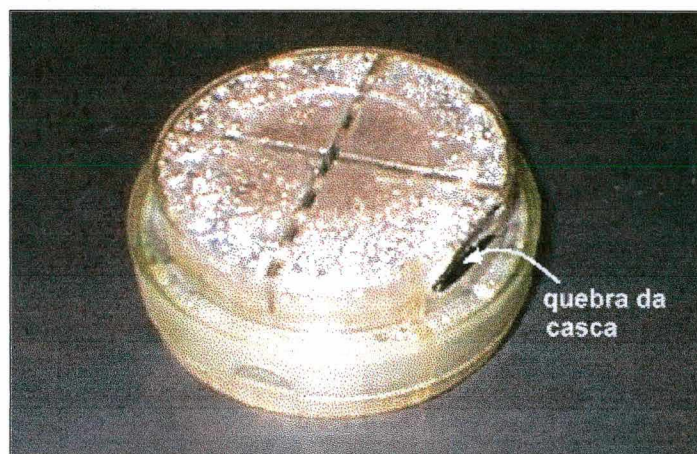


FIGURA 61 - Quebra do inserto durante o preenchimento

Outra fonte de deformação da casca, inerente ao processo de fundição, é a contração do metal fundido ao solidificar-se. Para minimizar este efeito, reforços estruturais (nervuras) foram incorporados à parte de trás da casca.

No preenchimento, é importante ainda garantir que todos os espaços, na parte de trás do inserto, sejam completamente preenchidos, evitando regiões internas que fiquem com ar aprisionado e, conseqüentemente, podendo não suportar as pressões elevadas, exercidas durante a moldagem

por injeção. O preenchimento uniforme depende basicamente de dois fatores. Primeiro, da forma geométrica da parte de trás do inserto, que pode conter um certo nível de detalhes, com cantos pequenos e de pouca inclinação, o que dificulta o preenchimento completo com o metal fundido. O segundo fator é o índice de fluidez do metal fundido. Quanto maior este índice, menor será a viscosidade e a tensão superficial, em uma dada temperatura, o que favorece o preenchimento. Assim, por exemplo, em uma mesma temperatura de fundido, o índice de fluidez da liga de estanho é menor do que o material *Metspec*, o que dificulta seu uso como material de preenchimento.

Outro problema, normalmente encontrado nesta etapa, é o surgimento de bolhas, principalmente na interface entre a resina (casca do inserto) e o metal (material de preenchimento do inserto), como mostra a Figura 62. Acredita-se que a origem das bolhas esteja relacionada à formação de gases, provenientes principalmente do aquecimento da resina pelo calor do metal fundido, além do próprio ar aprisionado. Observou-se que, quanto mais tempo o metal leva para solidificar-se, menor é a formação de bolhas na interface. Esta característica depende do tipo de metal que é utilizado e de sua temperatura durante o preenchimento. No entanto, o mecanismo de formação dessas bolhas não é completamente conhecido, sendo necessários mais estudos para investigar tal fato.

Durante o preenchimento dos insertos, deste estudo de caso, verificou-se que há uma formação bem maior de bolhas na interface resina/metal quando liga de estanho é utilizada. Isto pode ser explicado pelo fato que este material se solidifica mais rápido, ou seja, há menos tempo para o ar aprisionado “escapar” da interface metal e resina.

No preenchimento, com a liga preparada de bismuto e estanho, ocorreu um comportamento semelhante ao ocorrido com o material *Metspec*. Essa mistura possui uma temperatura de fusão menor do que o estanho puro, facilitando o preenchimento.

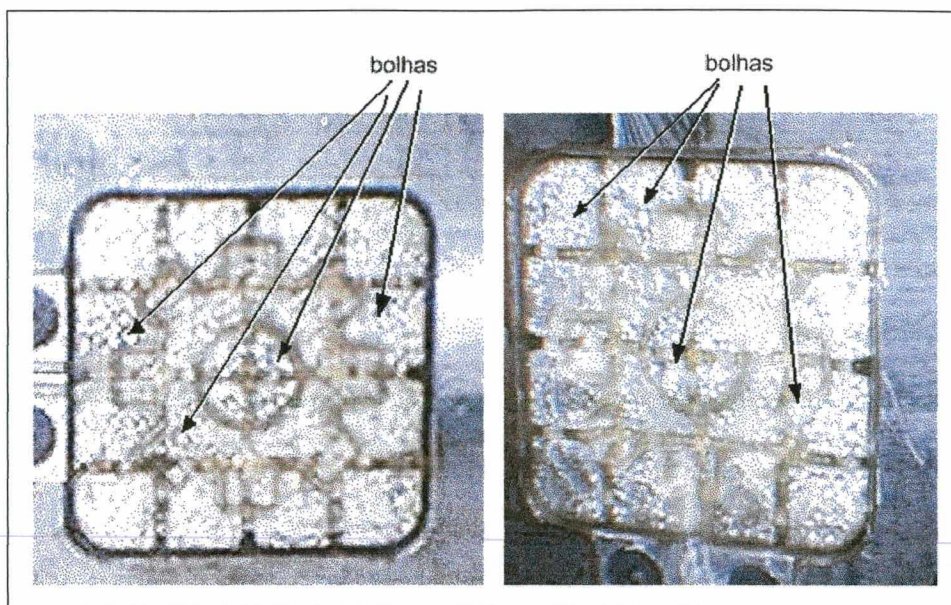


FIGURA 62 - Bolhas no inserto que podem ocorrer durante o preenchimento da parte de trás

5.1.3. COMPORTAMENTO DE FALHA DOS INSERTOS DURANTE A MOLDAGEM

No primeiro conjunto (Insertos #1), preenchido com liga de estanho, um total de 200 peças foram injetadas (200 ciclos de injeção) e nenhum sinal de falha do inserto foi observado visualmente. Em função desta quantidade de peças ser maior que os valores normalmente apresentados na literatura utilizada neste trabalho, o experimento foi interrompido nesse ponto, i.e., antes que o fim de vida dos insertos fosse pronunciado.

No entanto, no segundo conjunto de insertos testados, também preenchidos com liga de estanho, conforme apresentado no Capítulo anterior, a falha se pronunciou após 98 ciclos de injeção, além de apresentar um comportamento (da falha) diferente do que é indicado na literatura [90]. Isto porque não houve o “desprendimento” de pequenas lascas do inserto durante à extração, mas ocorreu afundamento seguido de ruptura da casca, justamente em uma região onde ficaram bolhas de ar aprisionadas na interface entre a liga de estanho e a resina, tendo como causa mais provável o preenchimento imperfeito, contudo só observado durante o processo de moldagem por injeção.

No terceiro conjunto, assim como no quarto, as peças foram injetadas com parâmetros um pouco mais agressivos, conforme apresentado na Tabela 8 (Capítulo 4). Devido a isso, era esperada uma produção menor de peças. O tipo de falha observado nesses insertos foi semelhante ao que ocorreu no conjunto #2, onde também houve afundamento da casca em regiões de bolhas de ar aprisionado na interface. O conjunto #3 suportou 64 ciclos de injeção até o fim de vida, enquanto que, para o conjunto #4, esse número foi consideravelmente menor (14 ciclos), indicando uma maior irregularidade do preenchimento neste.

No quinto conjunto de insertos, preenchidos com *Metspec*, não se verificou, visualmente, imperfeições do preenchimento (bolhas de ar), mesmo após a moldagem das peças. Por não haver bolhas prejudiciais no interior do inserto, pode ser observado que o comportamento de falha foi semelhante ao comentado na literatura [90]. Pequenas lascas de resina, principalmente em regiões de bordas da cavidade próximas à linha de partição do molde, começaram a se desprender após 38 ciclos de injeção. Mas o experimento continuou e um total de 48 peças foram produzidas. No conjunto #6, o comportamento de falha foi o mesmo do conjunto #5, no entanto, foram produzidas 40 peças até o fim de vida.

É importante salientar que foram utilizados, nesses dois últimos conjuntos, os mesmos parâmetros de injeção do conjunto #3, contudo, suas vidas foram menores. A Figura 63 apresenta a vida de cada um dos conjuntos de insertos deste estudo, em termos de ciclo de injeção.

Em geral, encontra-se na literatura que uma provável região de falha do inserto está localizada próxima ao ponto de injeção, por ser um local de grande abrasão entre o plástico injetado e o inserto. Porém, nenhum dos insertos deste estudo de caso apresentou esse tipo de falha, pelo menos visualmente, o que mostra que a recomendação, utilizada para o dimensionamento do ponto de injeção, apresentada no Capítulo 3, pode ser considerada aceitável.

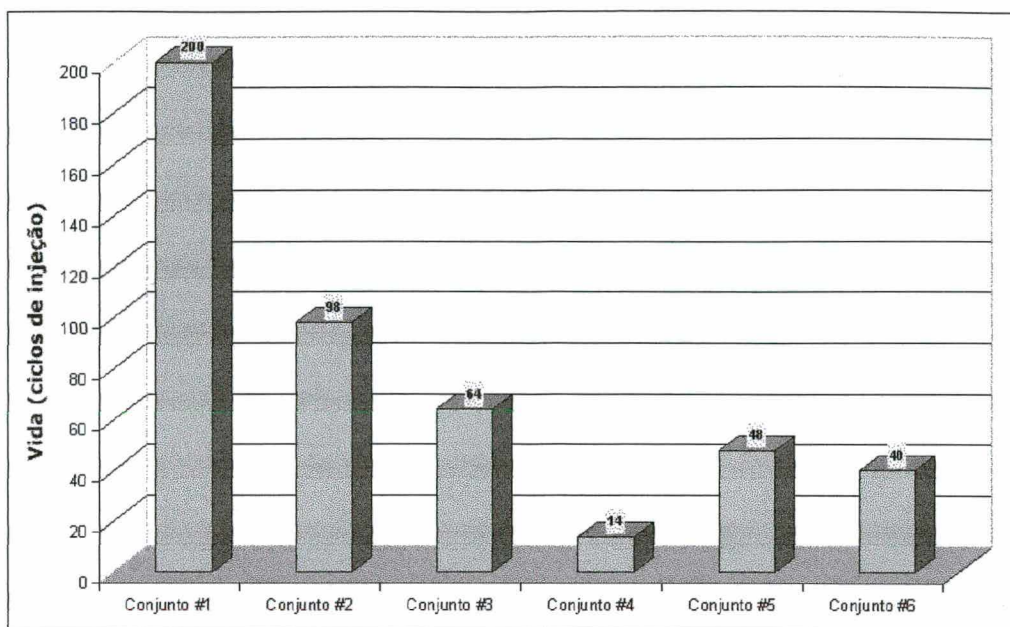


FIGURA 63 - Vida dos insertos do primeiro estudo de caso

Outro fato importante é que, conforme comentado, o tipo de falha dos insertos preenchidos com liga de estanho foi diferente dos preenchidos com *Metspec* e liga de estanho com bismuto. No entanto, acredita-se que, caso o preenchimento com liga de estanho seja considerado adequado, i.e., sem a formação de bolhas, o comportamento de falha seria o mesmo, porém iria ocorrer provavelmente após um número maior de ciclos de injeção, em função do inserto trabalhar em uma temperatura menor devido à maior condutividade térmica da liga de estanho. O próximo estudo de caso busca confirmar esse fato, dentre outros.

Em relação a aspectos visuais, não houve diferença entre as peças produzidas, seja com insertos preenchidos com liga de estanho ou com o material *Metspec*.

5.2. ESTUDO DE CASO 02

Foi realizado o segundo estudo de caso, onde uma nova peça, de forma geométrica mais complexa em relação a primeira, foi injetada (Figura 64). Os principais resultados são apresentados a seguir.

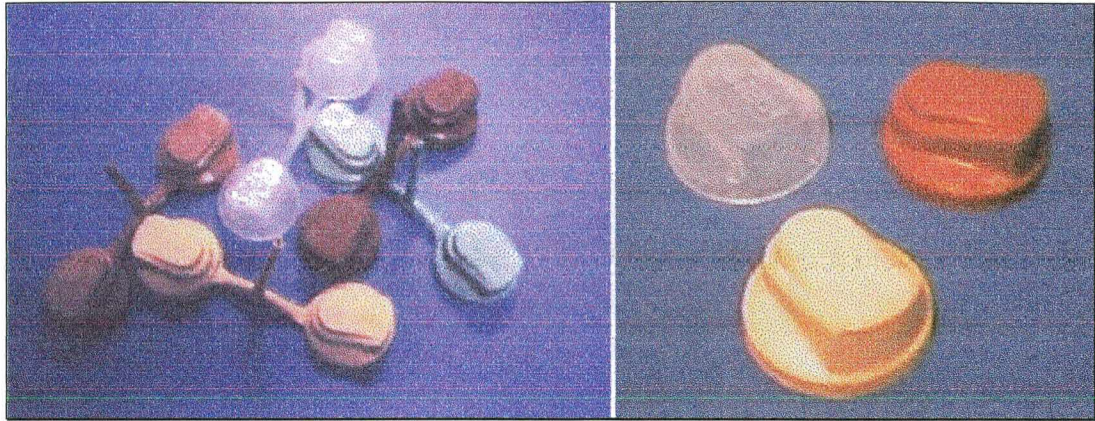


FIGURA 64 - Amostra de peças injetadas (estudo de caso 2)

5.2.1. TEMPO DE FABRICAÇÃO

O tempo consumido, na confecção de cada um dos dois conjuntos de insertos deste estudo de caso, foi basicamente o mesmo do estudo anterior, contudo, teve o acréscimo de uma nova etapa, o acabamento superficial. Esta é realizada de forma manual, com uso de lixas de granulometrias variadas, e, por isso, depende essencialmente da habilidade do operador, além de consumir um tempo considerável, como mostra a Figura 65.

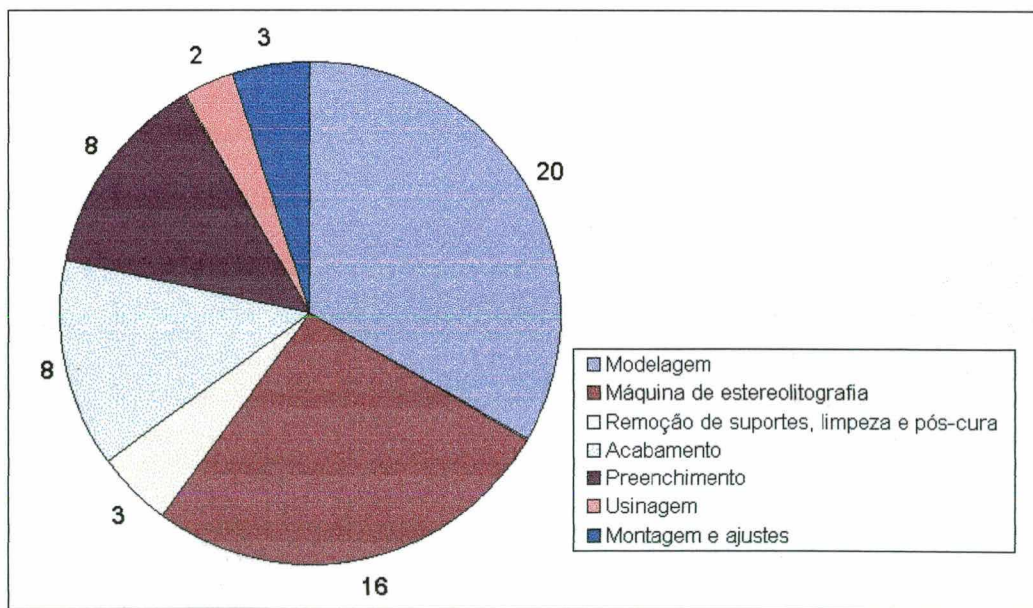


FIGURA 65 - Tempo de confecção, em horas, de um conjunto de insertos (estudo de caso 02)

5.2.2. COMPORTAMENTO DE FALHA DOS INSERTOS

O conjunto de insertos #7 não apresentou imperfeições (bolhas de ar), visualmente, no preenchimento com a liga de estanho. Neste conjunto, 190 ciclos de injeção foram completados sem que indícios visuais de falha fossem observados. A partir desse momento, verificou-se o aparecimento de uma trinca no inserto-fêmea. Contudo, tal falha não afetou a qualidade da peça injetada e o experimento continuou. Depois de 240 ciclos, pequenas lascas de resina, nas bordas da cavidade próximas à linha de partição, começaram a se desprender. Um total de 270 peças (ou ciclos) (Fig. 66) foram produzidas, até que o lascamento excessivo levou ao fim de vida do inserto, o que acabou afetando as características da peça.

De forma semelhante, o conjunto #8, preenchido com *Metspec*, apresentou uma trinca na mesma região já observada no conjunto anterior. Contudo, essa trinca foi verificada a se completar cerca de 140 ciclos. Também houve o lascamento, em regiões da cavidade, próximas à linha de partição. Porém, o fim de vida (lascamento excessivo) pronunciou-se após 200 ciclos, como mostra a Figura 66.

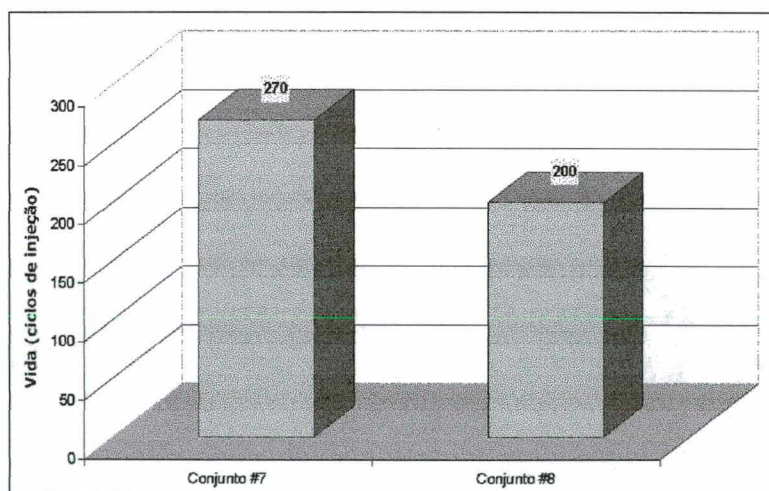


FIGURA 66 - Vida dos insertos do segundo estudo de caso

Esses resultados indicam que o tipo de falha no inserto, quando não ocorre durante a injeção, devido ao preenchimento irregular, irá acontecer posteriormente, após um certo número de ciclos, durante a extração, através do desprendimento de lascas de resina.

5.2.3. APARÊNCIA DAS PEÇAS PRODUZIDAS

As peças produzidas, em ambos conjuntos de insertos, apresentaram a mesma aparência, sendo observada uma pequena formação de rebarbas. Porém, como os insertos de estereolitografia possuem uma aplicação específica (pequenos lotes de peças), essas rebarbas podem ser consideradas aceitáveis. Os detalhes do inserto são bem reproduzidos na peça injetada, sendo possível, inclusive, observar o efeito do *hatch* do laser, gerado durante a fabricação na máquina de estereolitografia.

Algumas peças produzidas apresentaram linhas de solda fria, principalmente na região oposta ao ponto de injeção, confirmando a simulação apresentada no Capítulo 4. Observou-se também que o uso excessivo de agente desmoldante, à base de silicone, contribui para a maior formação de linhas de solda, em função de formar uma película entre as frentes de avanço do plástico que está sendo moldado. Todavia, verificou-se que essas linhas de solda ocorreram, com mais frequência e de forma mais acentuada, no conjunto de insertos preenchidos com liga de estanho, sendo esta uma indicação que a temperatura, neste conjunto, é inferior àquele preenchido com *Metspec*.

5.2.4. TEMPERATURA DOS INSERTOS

A temperatura dos conjuntos #7 e #8 foram monitoradas ao longo de alguns ciclos de injeção, afim de confirmar se o preenchimento com a liga de estanho permite que o inserto trabalhe em uma temperatura inferior, em relação ao preenchido com *Metspec*. Em função do

experimento ser baseado em uma única replicação, i.e., um conjunto de insertos para cada condição (liga de estanho ou *Metspec*), os resultados apresentados têm caráter apenas indicativo.

A Figura 67 mostra uma típica curva de temperatura do inserto, durante um ciclo de moldagem, antes do molde entrar em regime. Logo após a injeção, a temperatura eleva-se rapidamente, atingindo cerca de 24°C. Contudo, observa-se que é consumido um período maior para voltar ao patamar inicial (cerca de 19°C), o que mostra a necessidade de um tempo longo de ciclo, para o inserto de estereolitografia. Em função da peça injetada contribuir para reter o calor no interior do inserto, por também possuir baixa condutividade térmica, é recomendado extraí-la rapidamente, a partir do momento em que estiver solidificada. Após a extração, ainda é preciso um período de espera (tempo de molde aberto), para reduzir a temperatura do inserto ao valor inicial, até que o próximo ciclo ocorra.

Embora tenham sido adquiridos em tempos diferentes, em função do sistema de aquisição de dados utilizado possuir um único canal, as temperaturas dos insertos, preenchidos com liga de estanho e com *Metspec*, foram superpostas no gráfico apresentado na Figura 68, para fins de comparação.

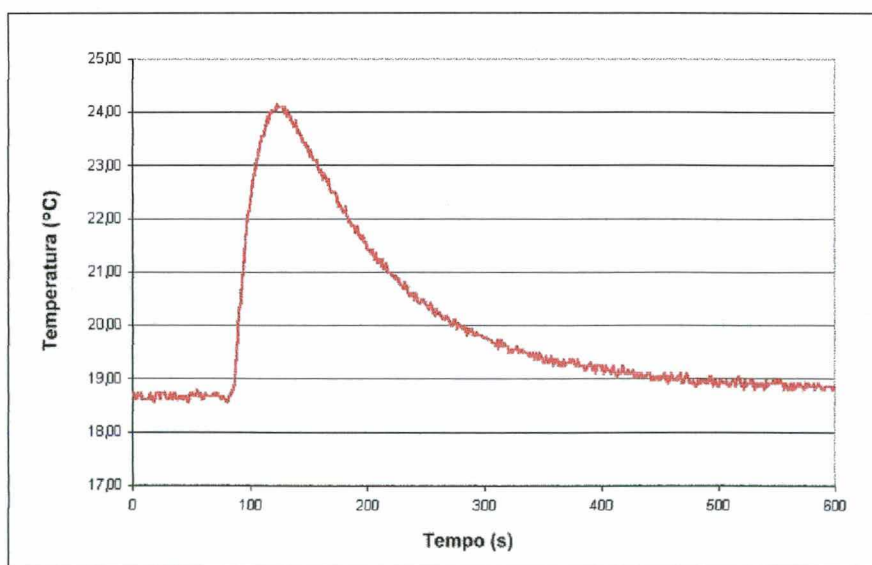


FIGURA 67 - Temperaturas durante um ciclo de moldagem por injeção (para conjunto #8)

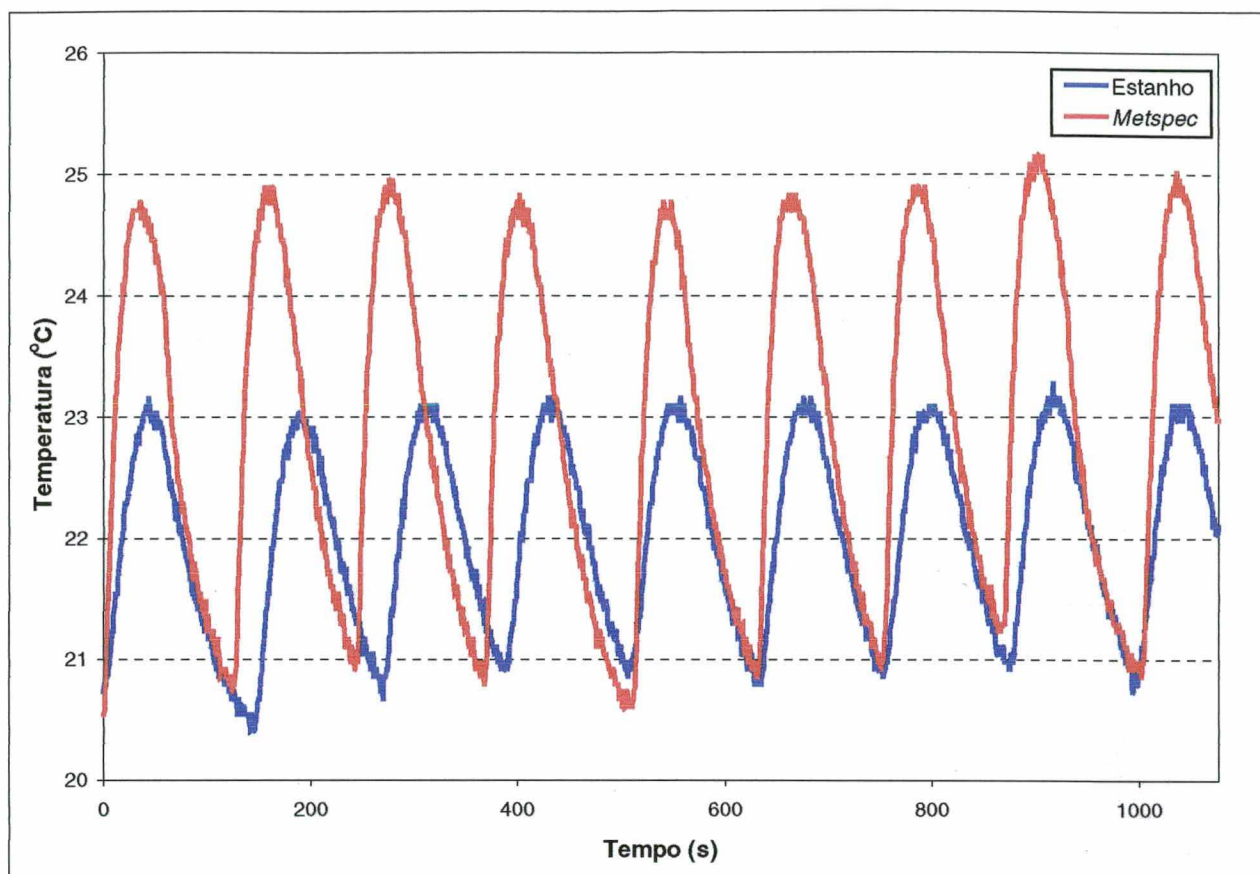


FIGURA 68 - Temperaturas dos insertos preenchidos com liga de estanho e com *Metspec*

Após o molde estar em regime, a menor temperatura observada foi da ordem de 21°C. No ponto de medição adotado, no conjunto #7, preenchido com liga de estanho, verificou-se um aumento de aproximadamente 2°C após a injeção do termoplástico. Enquanto que, no inserto preenchido com *Metspec*, o acréscimo foi maior, cerca de 4°C, mesmo mantendo os mesmos tempos de ciclo. Como a liga de estanho utilizada possui maior condutividade térmica, este resultado era esperado.

O acréscimo de 4°C no inserto preenchido com *Metspec* é próximo aos apresentados em outros trabalhos [38], utilizando-se o mesmo material, onde observou-se aumentos de 5 a 8°C. Contudo, em insertos preenchidos com mistura de epoxi e alumínio em partículas, a elevação da temperatura, após a injeção, pode ser até da ordem de 40°C, alcançando temperaturas acima de

80°C, conforme apresentado por *Rahmati* [42], fato esse que contribui para confirmar a maior eficiência do preenchimento com metais de baixo ponto de fusão, em termos de transferência de calor no molde, em relação aos insertos preenchidos com mistura de epoxi e alumínio.

5.3. ESTUDO DE CASO 03

Um lote de aproximadamente 80 protótipos injetados do separador de cabos foi produzido com uso de insertos de estereolitografia (Figura 69), atendendo aos objetivos deste estudo de caso. Contudo, foram encontradas maiores dificuldades na confecção dos insertos, principalmente nas etapas de acabamento superficial e preenchimento da parte de trás, conforme será descrito a seguir.

5.3.1. ACABAMENTO SUPERFICIAL

Em função da maior complexidade geométrica da peça, que possui paredes com profundidade elevada em relação à espessura, principalmente nas regiões das aletas, os procedimentos de acabamento superficial dos insertos tornaram-se mais complicados.

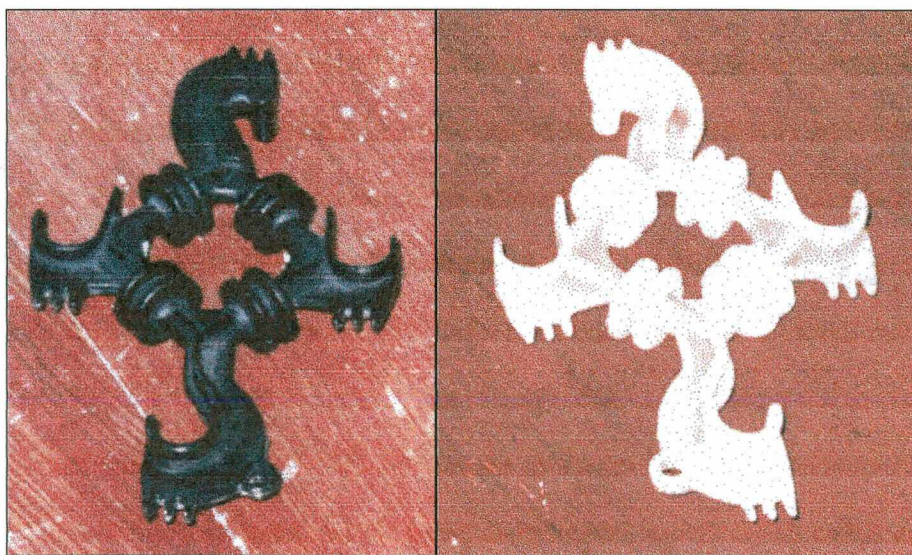


FIGURA 69 - Amostra de peças injetadas (estudo de caso 3)

É natural e óbvio que, para fazer o acabamento, as ferramentas utilizadas (lixas, feltros de polimento ou outros) precisam alcançar a região a ser acabada. Porém, com a limitação de espaço físico nos insertos, isso tornou-se uma tarefa complexa, mesmo com o uso de “ferramentas de forma”, não sendo possível garantir um acabamento uniforme. Nas regiões das aletas pode-se inclusive observar, visualmente, os “degraus de escada” produzidos durante a fabricação na máquina de estereolitografia, pois não puderam ser eliminados completamente com o acabamento.

5.3.2. PREENCHIMENTO COMPOSTO

Utilizou-se preenchimento composto neste estudo de caso. As regiões próximas à cavidade, que são as mais críticas, foram preenchidas com *Metspec*, que possui um ponto de fusão inferior à liga de estanho usada. Além disso, o índice de fluidez deste material é maior, o que facilita o preenchimento de pequenos detalhes da parte de trás do inserto e minimiza a quantidade de bolhas na interface com a resina epoxi, apesar de ser desfavorável à transferência de calor por possuir menor condutividade térmica. Visando melhorar a condução de calor no inserto, o restante do preenchimento é realizado com a liga à base de estanho.

Embora a quantidade e dimensões das bolhas tenham sido minimizadas, o preenchimento causou bastante deformação no inserto, principalmente devido às maiores dimensões dos insertos deste estudo de caso. Isso pode ser explicado pelo fato que a massa de metal de preenchimento é adicionada em proporção direta às suas dimensões (volume). Assim, uma massa maior de liga de estanho foi utilizada, o que provocou maior contração (inerente à fundição) e, conseqüentemente, maiores deformações.

Em função da deformação excessiva, que não asseguraria o fechamento do molde para a moldagem por injeção, foi necessário colocar os insertos em uma prensa para procurar reduzir a

altura de “flecha” da deformação, que no caso foi da ordem de 3 a 4 mm (em relação a maior diagonal entre duas extremidades do inserto).

5.3.3. MOLDAGEM POR INJEÇÃO DAS PEÇAS

Em função do acabamento superficial não uniforme, as peças aderiram-se bastante às superfícies dos insertos, dificultando a extração. Foi preciso pulverizar agente desmoldante e utilizar jato de ar comprimido. Devido à extração ter sido manual, algumas peças deformaram. Embora não se tenha tentado, acredita-se que o uso de pinos extratores auxiliaria a minimizar esse problema. Houve também rebarbas nas peças, em função das deformações do inserto, causadas durante o preenchimento da parte traseira.

Por se tratar de uma peça com regiões de espessuras bastante distintas, para auxiliar a extração, foi ainda utilizado jato de ar comprimido, que também contribuiu para refrigerar e completar a solidificação da peça, especialmente na região da seção entre duas aletas.

Após a injeção, durante a abertura do molde, foi observado que esta região consumia mais tempo para solidificar até o ponto da peça poder ser extraída. Em alguns ciclos, a peça injetada rompeu nesta seção, durante a extração. Contudo, com a aplicação de jato de ar nestas regiões, o problema foi minimizado.

A razão do maior tempo para solidificar a peça, principalmente nesta região, está relacionada à espessura de casca do inserto, que não foi uniforme, possuindo paredes de dimensões espessas especialmente nesta seção, conforme explicado no Capítulo 4.

5.4. ESTUDO DE CASO 04

Peças de cera, para microfusão, foram produzidas neste trabalho (Figura 70), com o uso de insertos de resina fabricados por estereolitografia, o que mostra este processo pode ser

utilizado para a produção de peças em outros tipos de materiais, i.e., não somente termoplásticos. Contudo, existem limitações, conforme indicam os resultados a seguir.

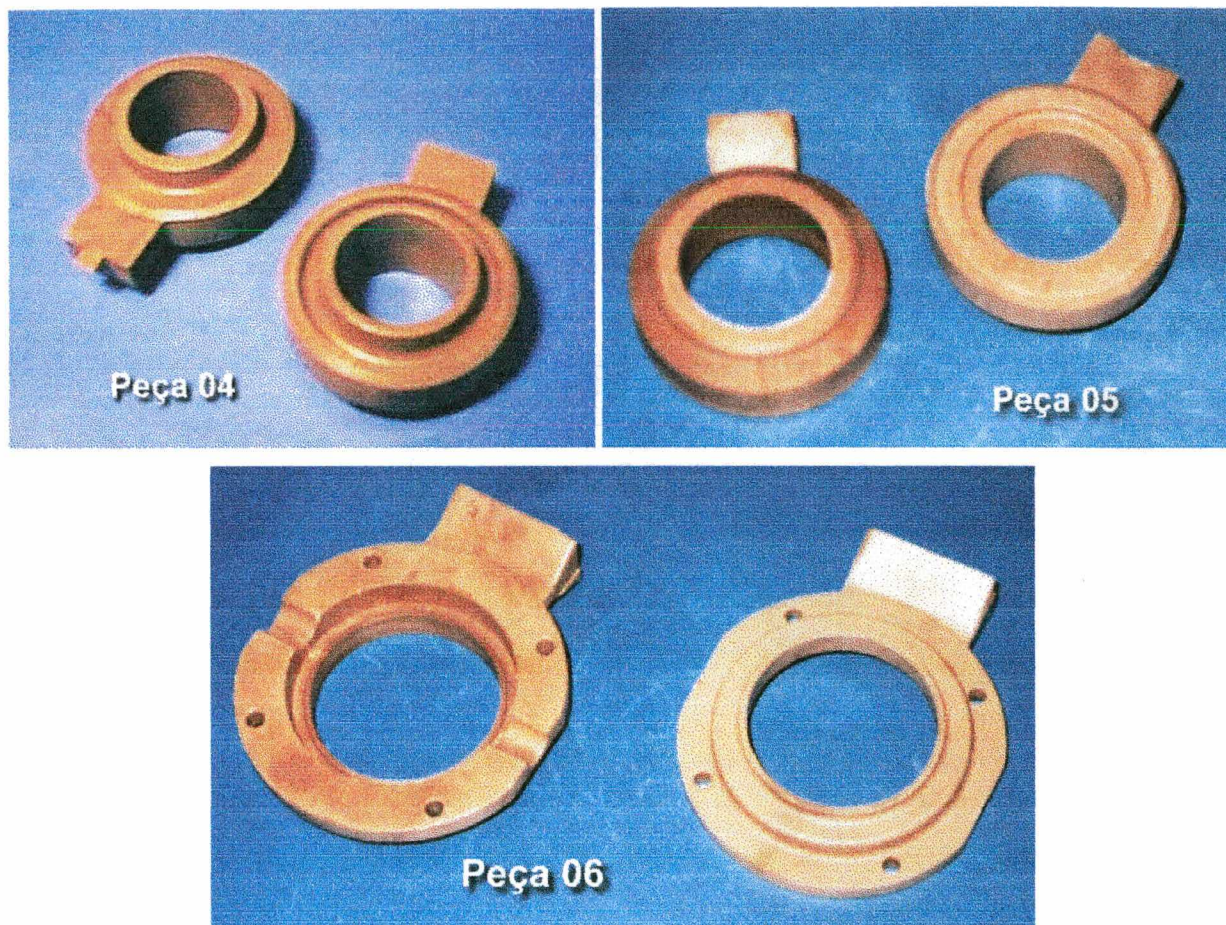


FIGURA 70 - Amostra de peças injetadas (estudo de caso 4)

5.4.1. INCERTEZA DIMENSIONAL DE PEÇAS DE CERA INJETADAS

Para investigar se existe uma diferença entre as peças produzidas com uso de insertos de estereolitografia e de aço, em relação ao critério incerteza dimensional, as principais dimensões (Figura 71), na faixa de 30 a 90 mm, foram medidas, em relação ao plano X-Y de fabricação dos insertos.

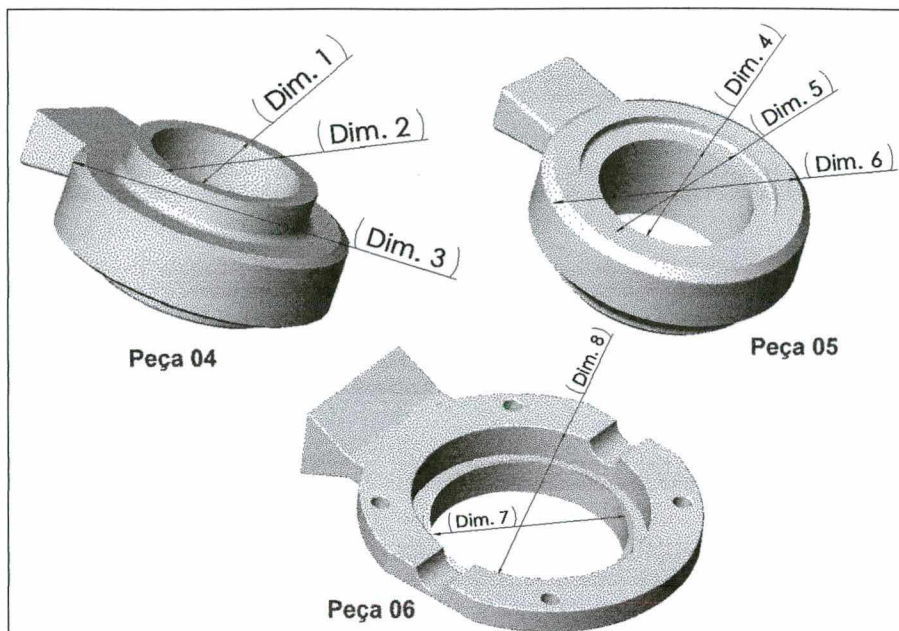


FIGURA 71 - Dimensões medidas nas peças de cera injetadas

Utilizou-se um paquímetro para fazer as medições (incerteza de 0,02 mm), em função de ser considerado suficiente para fornecer uma indicação da incerteza dimensional das peças. Os resultados (média, desvio padrão, intervalo de confiança, com $\alpha=5\%$, e os valores máximos e mínimos observados para cada amostra) são apresentados na Tabela 15 e mostrados graficamente nas Figuras 72 a 74, em termos de desvio em relação ao valor da dimensão nominal, modelada no CAD.

TABELA 15 -Média, desvio padrão, intervalo de confiança e máximos/mínimos observados

	Peça 04						Peça 05						Peça 06			
	Dim. 1		Dim. 2		Dim. 3		Dim. 4		Dim. 5		Dim. 6		Dim. 7		Dim. 8	
	SL	Aço	SL	Aço	SL	Aço	SL	Aço	SL	Aço	SL	Aço	SL	Aço	SL	Aço
Valor Nominal	33.70		41.50		61.90		36.65		46.70		63.10		73.20		88.55	
Média (mm)	34.08	33.73	41.35	41.48	61.88	61.85	36.82	36.71	46.47	46.65	62.73	63.05	73.59	73.28	88.90	88.63
Desvio Padrão (mm)	0.13	0.02	0.15	0.03	0.13	0.06	0.07	0.04	0.08	0.05	0.08	0.02	0.07	0.03	0.17	0.04
Interv. Conf. (mm)	±0.05	±0.01	±0.06	±0.01	±0.05	±0.02	0.03±	±0.01	±0.03	±0.02	±0.03	±0.01	±0.03	±0.01	±0.06	±0.01
Mínimo (mm)	33.88	33.70	41.12	41.44	61.50	61.76	36.64	36.62	46.32	46.58	62.60	63.02	73.48	73.20	88.66	88.56
Máximo (mm)	34.30	33.76	41.60	41.54	62.14	61.94	39.94	36.78	46.58	46.72	62.86	63.08	73.68	73.34	89.12	88.70

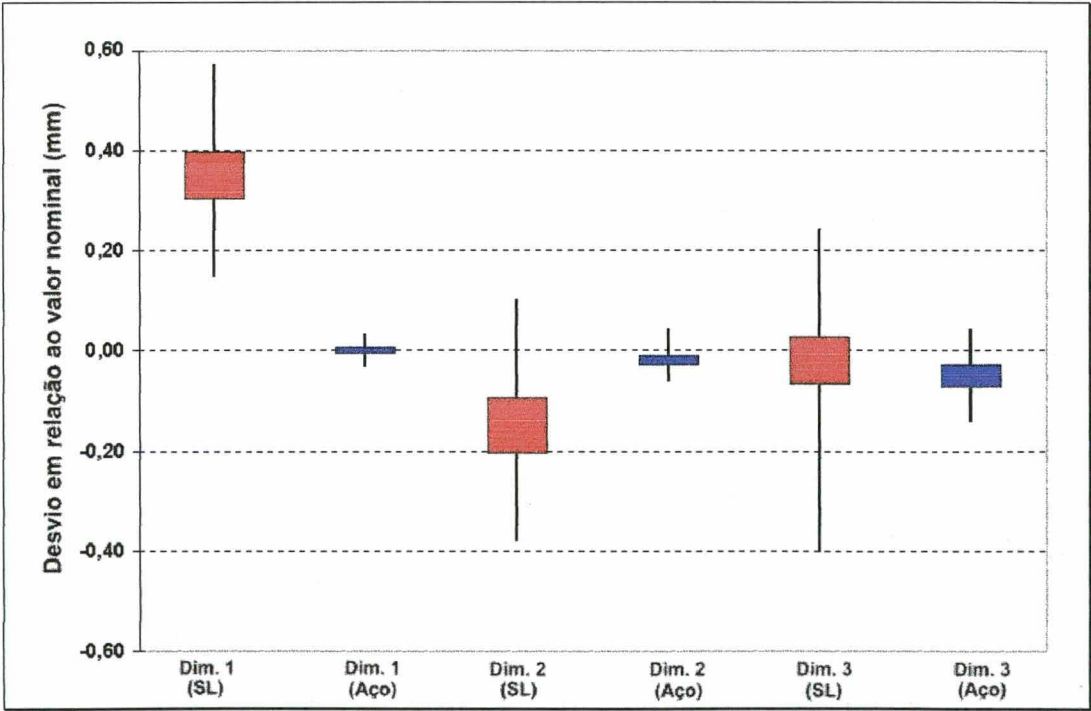


FIGURA 72 - Incerteza dimensional de peças do tipo #4

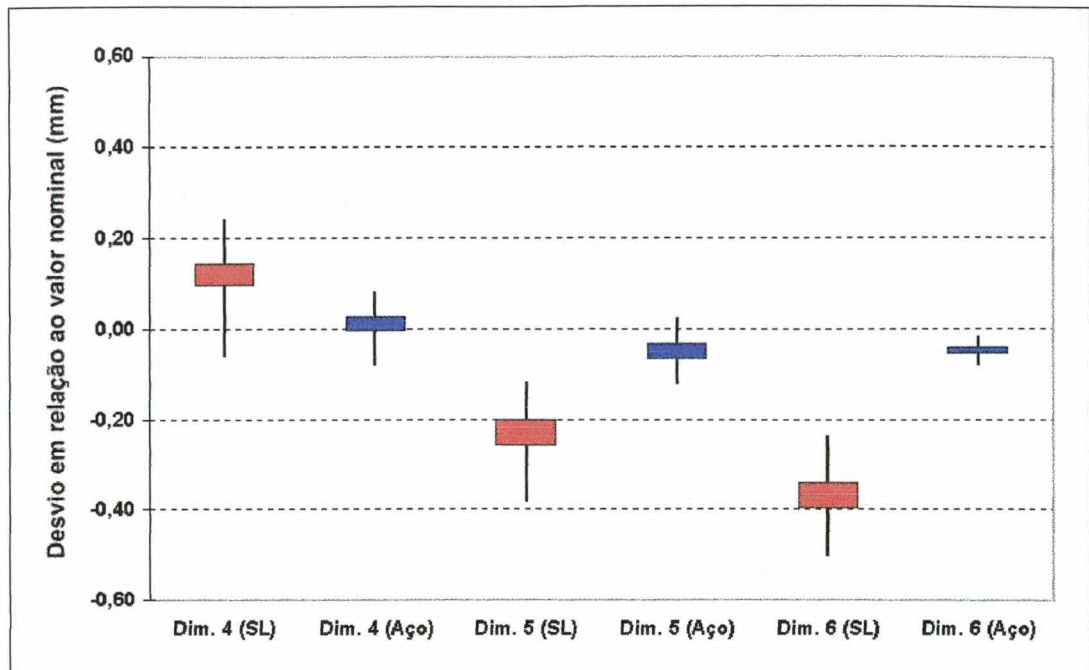


FIGURA 73 - Incerteza dimensional de peças do tipo #5

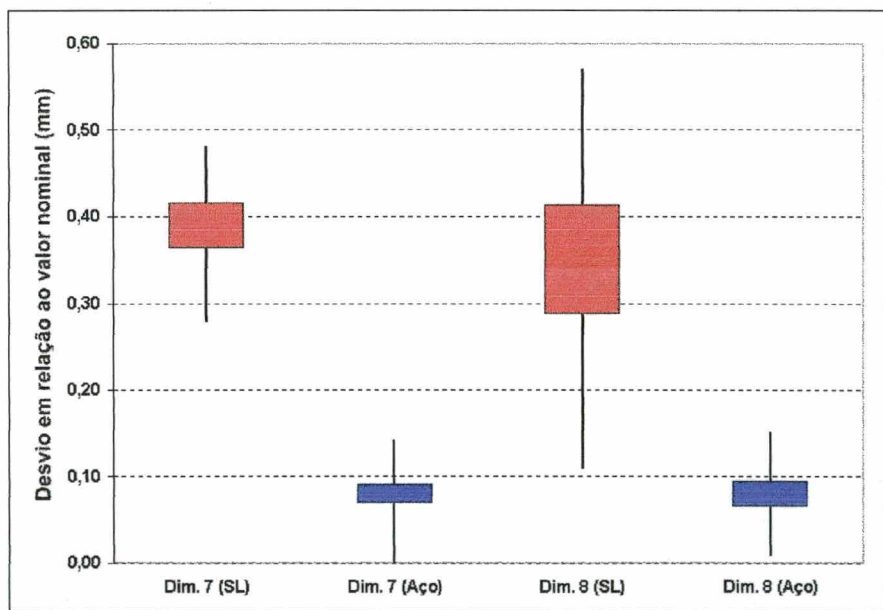


FIGURA 74 - Incerteza dimensional de peças do tipo #6

Em geral, as peças de cera, produzidas com insertos de estereolitografia, apresentaram ordens de incerteza dimensional superiores às fabricadas com moldes tradicionais (cerca $\pm 0,2$

mm a $\pm 0,4$ mm), assim como apresentado na comparação realizada por Paradis [105], para peças de plástico. Todas as médias foram significativamente diferentes entre ambos tipos de insertos, com exceção da dimensão #3, da peça #4. A ordem de grandeza dos desvios padrões das peças produzidas, com insertos de resina, foi pelo menos duas vezes maior, o que mostra maior variabilidade das dimensões em torno da média. A diferença entre os valores máximos e mínimos, observados nas amostras, foi também maior.

5.4.2. INCERTEZA DIMENSIONAL DURANTE A FABRICAÇÃO DO INSERTO

Visando identificar qual(is) etapa(s) de confecção do inserto de estereolitografia tem mais influência nos resultados menos precisos, em relação aos de aço, apresentados no item anterior, o conjunto de insertos da peça #5 foi medido com uso de paquímetro. A Figura 75 mostra a incerteza dimensional (intervalo de confiança e valores máximos e mínimos), observada durante as principais etapas de fabricação.

Após a construção, na máquina de estereolitografia, verificou-se uma tolerância de $\pm 0,10$ a $\pm 0,20$ mm, que é normalmente a encontrada em peças fabricadas por este processo. Ainda nessa etapa, o desvio padrão do inserto foi praticamente o mesmo observado nas peças de cera produzidas com insertos de aço.

No entanto, houve mudança significativa na média das dimensões medidas após o preenchimento, como apresenta a Figura 75, embora o desvio padrão tenha se mantido praticamente o mesmo. Todavia, após os procedimentos de acabamento superficial da cavidade, tanto a média quanto o desvio padrão se alteraram em relação a etapa anterior, no entanto, em direção oposta. Esses resultados indicam que o inserto se deforma e aumenta suas dimensões (“incha-se”) durante o preenchimento com metais de baixo ponto de fusão, contudo, tende à

retornar a dimensão nominal após o acabamento superficial, em função da remoção de material de suas superfícies.

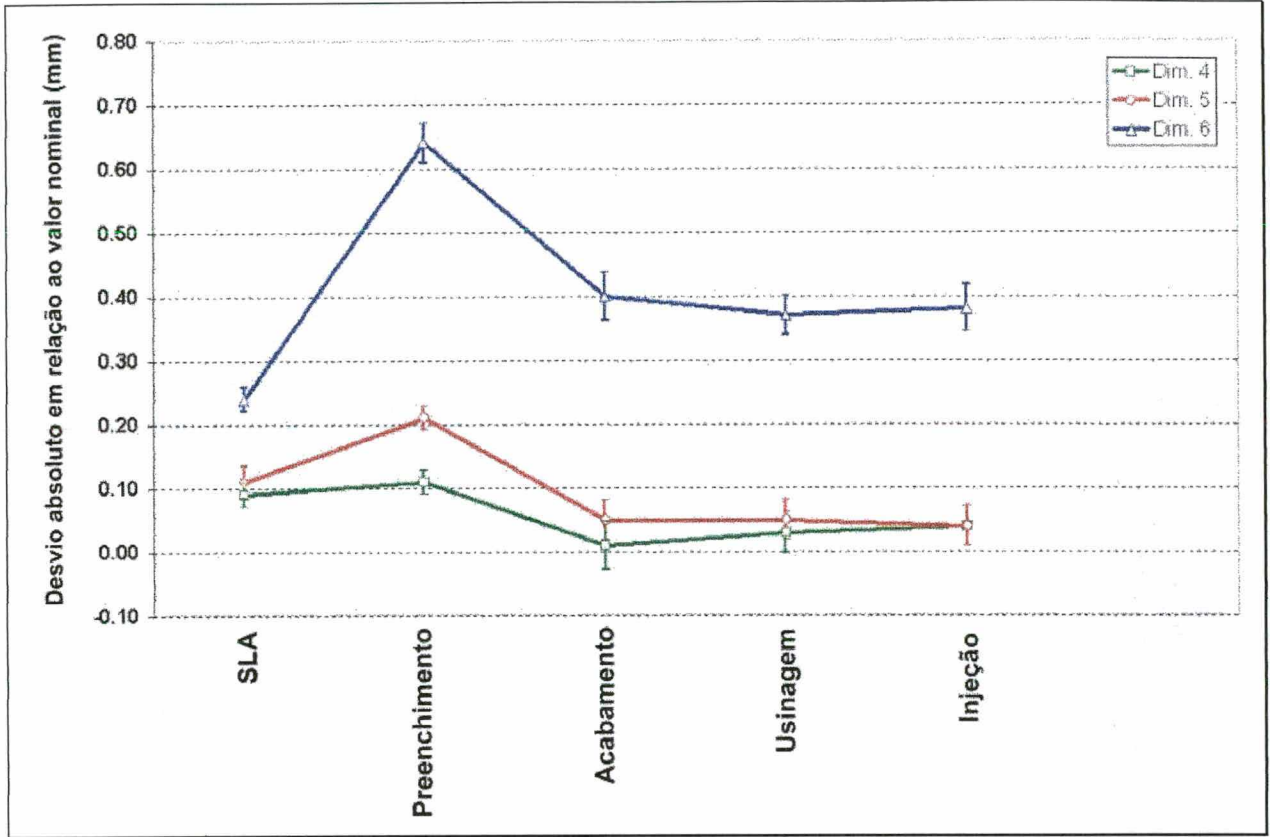


FIGURA 75 - Incerteza dimensional absoluta durante a fabricação do inserto

Por outro lado, os procedimentos de acabamento superficial são normalmente realizados manualmente e, portanto, os resultados dependem da habilidade do técnico responsável por essa operação. É uma etapa de difícil controle, principalmente em insertos de estereolitografia ao invés de aço, pois as resinas, à base de epoxi, apresentam uma resistência muito menor à remoção de material, seja por lixamento ou polimento, o que torna complexo remover os “degraus de escada” sem alterar de forma significativa as dimensões.

Após a injeção dos padrões de cera, não foi observado mudança na incerteza dimensional dos insertos de estereolitografia.

5.4.3. MOVIMENTOS RELATIVOS

Na bibliografia utilizada, não encontrou-se referência sobre o uso de insertos de estereolitografia com presença de movimentos relativos. Porém, os insertos para injeção de cera, fabricados neste trabalho, possuíam movimentos entre paredes de resina, no caso o deslocamento do inserto-macho no interior da fêmea durante a extração, conforme mostrado no Capítulo 4.

Na moldagem por injeção das peças, não foram observados problemas nesse movimento, sendo apresentado comportamento semelhante aos fabricados em aço. O uso de agente desmoldante contribui também para lubrificar o deslocamento relativo dos insertos. Contudo, isso foi obtido para cera, durante alguns ciclos, que é injetada em baixas temperaturas e pressões. Portanto, não se pode estender esses resultados para injeção de termoplásticos, assim como não se sabe como é o desgaste das superfícies dos insertos, devido ao atrito causado pelo movimento, no decorrer de muitos ciclos de moldagem.

5.4.4. TEMPO DE CICLO DE MOLDAGEM

Em função da cera ser pouco agressiva ao molde (é um material pouco abrasivo e que é injetado em baixas temperaturas e pressões), quando comparados aos termoplásticos de engenharia, uma maior produção é esperada. Nesse caso, a princípio, os insertos de estereolitografia poderiam ser utilizados não somente para a produção de pequenas séries de peças. Todavia, para isso se tornar viável economicamente, é importante que o tempo de ciclo de moldagem seja próximo ou menor que o obtido com moldes de aço.

Contudo, neste trabalho, o tempo necessário para resfriar e solidificar a peça, no interior da cavidade, foi pelo menos duas vezes superior quando utilizando insertos de estereolitografia, como mostra a Figura 76, devido principalmente à baixa condutividade térmica da resina. Outro fato que contribui para tempos de ciclo longos é que a cera, assim que é injetada, forma

rapidamente uma película sólida, ao redor da cavidade. Essa película age como resistência à transferência de calor, sendo particularmente problemático em regiões de paredes espessas (embora isso também ocorra em insertos de aço). Para a peça ser extraída sem deformações, ou quebra, é importante que essas regiões estejam completamente solidificadas. Considerando aspectos visuais, as peças produzidas em ambos tipos de insertos tiveram a mesma aparência.

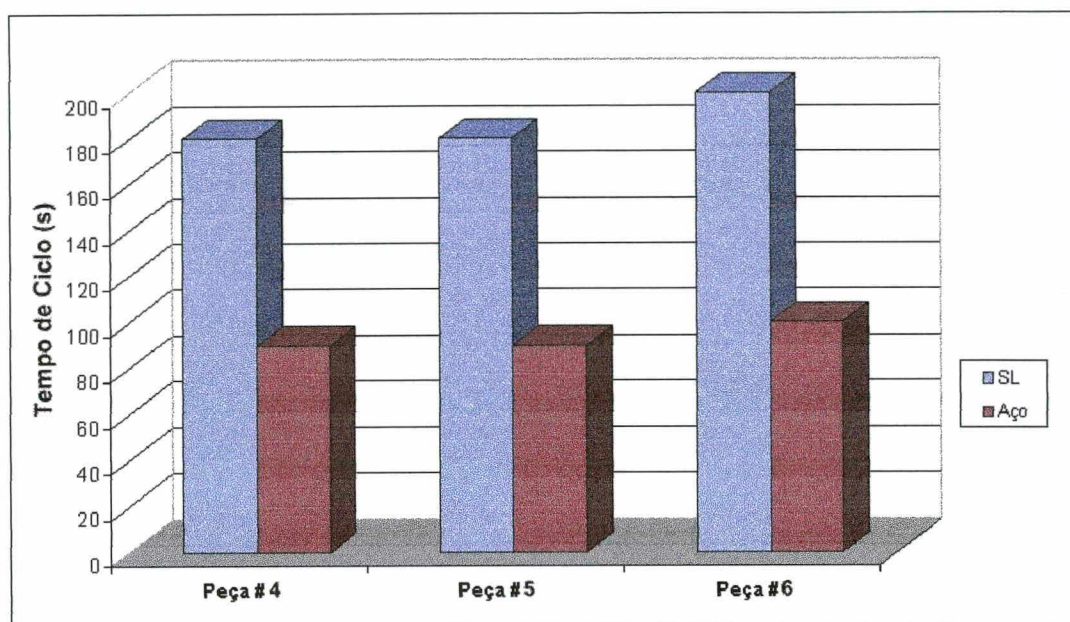


FIGURA 76 - Comparação de tempo de ciclo durante a moldagem de cera

É importante mencionar que, conforme comentado no Capítulo anterior, não foi possível utilizar refrigeração (circulação de água através de tubos de cobre) durante a injeção, para reduzir os tempos, pois a injetora e porta-moldes disponíveis não estavam preparados para esta operação.

5.4.5. TEMPO DE CONFECCÃO DOS INSERTOS

O tempo de fabricação é uma importante variável a ser considerada, pois está relacionada ao custo. No caso dos insertos de aço utilizados neste trabalho, o tempo de usinagem de um

conjunto foi da ordem de **vinete e cinco horas (25 h)**⁵. No caso dos insertos de estereolitografia, o tempo de máquina foi da mesma ordem, embora utilizando uma SLA-250/30, que é uma das máquinas mais lentas disponíveis no mercado.

Todavia, a estereolitografia pode ser considerada mais vantajosa em casos onde a complexidade geométrica é maior, o que normalmente requer longos períodos de fabricação caso sejam utilizados processos convencionais. Em função do princípio de fabricação por adição sucessiva de camadas, insertos com formas geométricas complexas podem ser construídos, através da estereolitografia, tão rapidamente quanto de formas simples, desde que possuam volume e dimensões externas semelhantes, conforme já comentado. Contudo, isso já não ocorre na usinagem convencional.

⁵ Dado fornecido pela empresa onde os ensaios foram realizados.

6. CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE INSERTOS DE RESINA FABRICADOS POR ESTEREOLITOGRAFIA

Em função dos resultados obtidos através da realização dos estudos de caso, este trabalho comprovou ser possível utilizar insertos de resina termofixa, fabricados diretamente por estereolitografia, em moldes para a moldagem por injeção. É importante salientar que, no estágio atual de desenvolvimento, este processo possui uma aplicação específica, i.e., a produção rápida de pequenos lotes de protótipos e/ou peças injetadas, devido às limitações das resinas utilizadas e às condições adversas do processo de injeção.

Por definição (*Direct AIM*), trata-se de um processo direto, para a moldagem por injeção, com uso de insertos fabricados por estereolitografia. Contudo, existem etapas durante a fabricação que tornam o processo não tão direto (da máquina de estereolitografia à injetora), como o preenchimento da parte traseira dos insertos e o acabamento superficial das cavidades.

O preenchimento da parte traseira com metais de baixo ponto de fusão pode destruir o inserto antes mesmo da moldagem por injeção, além de consumir tempo considerável, principalmente pelo fato que é realizado de forma manual, dependendo da habilidade do operador. Todavia, isso também pode ocorrer quando se usa mistura de epoxi e partículas de alumínio, pois a cura desse material é um processo exotérmico, que aquece o inserto e pode também causar deformações, segundo [30, 38, 40].

Os resultados dos estudos de caso 01 e 02 indicam que o uso da liga de estanho, como preenchimento, em relação ao “melhor” material recomendado na literatura estrangeira (*Metspec*, conforme apresentado no Capítulo 3), possibilita uma maior taxa de transferência de calor no molde, fazendo com que o inserto de resina trabalhe em uma temperatura menor, durante a moldagem por injeção, contribuindo assim para o aumento de sua vida útil. Outro

ponto interessante é que essa liga de estanho é facilmente encontrada no Brasil, a preços mais acessíveis do que o *Metspec*. Isso mostra que a solução, apresentada na literatura utilizada neste trabalho, inclusive pela *3D Systems* e pelo *IPI*, que desenvolveram este processo, não é necessariamente a mais adequada, no que se refere ao preenchimento da parte traseira, pois existem alternativas viáveis, como o próprio uso de liga de estanho. Um aspecto limitante deste material é a dificuldade para se fazer, manualmente, o preenchimento, devido ao seu elevado ponto de fusão e à maior tendência à formação de gases.

Uma alternativa para minimizar o efeito negativo da liga de estanho é fazer o preenchimento composto, onde as regiões da parte traseira da casca de resina, próximas à cavidade, são preenchidas com materiais de ponto de fusão menor e que permitem a menor formação de bolhas. Contudo, é importante ainda utilizar a liga de estanho no restante, para aumentar a taxa de transferência de calor.

Quanto maior as dimensões do inserto, maior será a quantidade de material de preenchimento necessária e, conseqüentemente, há um aumento na tendência do inserto a se deformar, como foi observado no estudo de caso 03, fato este que dificulta a aplicação do processo para peças de grandes dimensões.

Outro aspecto, observado com a realização dos estudos de caso, é que existe uma quantidade adequada de nervuras, que devem ser incorporadas à parte de trás da casca, durante a etapa de projeto dos insertos, para que não ocorra deformação excessiva quando for realizado o preenchimento com metais de baixo ponto de fusão. Essa quantidade foi definida como uma relação da área projetada do inserto. Os insertos que não apresentaram deformação, a nível visual, possuíam cerca de 10 a 15% da área projetada em nervuras, projetadas como paredes verticais, distribuídas da forma mais uniforme possível, com 2,0 mm de espessura e 10 a 15 mm de altura. Contudo, a deformação do inserto não é função somente da quantidade de nervuras, mas também do tipo de material usado, sendo necessária a realização de novas pesquisas e

estudos específicos para avaliar a quantidade correta desses reforços. Nas paredes das nervuras, foram incorporados alguns “rebaixos de ancoragem”, para impedir que o material de preenchimento se desprendesse, por dificuldades de adesão à resina. Ao invés de rebaixos, paredes com inclinação negativa poderiam também ser utilizadas para este fim.

Assim como o preenchimento, a etapa de acabamento superficial das cavidades do inserto de resina requer cuidados especiais, principalmente por também ser realizada de forma manual. A resina de estereolitografia possui menor resistência ao desgaste por abrasão do que os aços tradicionalmente utilizados na fabricação de moldes. Isso, por um lado, facilita o acabamento, em função de necessitar uma menor força para remover o material em excesso (os “degraus de escada”). Contudo, o controle, para manter a dimensão correta, torna-se mais complicado.

Os resultados obtidos, com a realização do estudo de caso para injeção de cera, indicam que é durante as etapas de preenchimento e de acabamento que ocorrem as maiores alterações de desvios dimensionais, em relação ao valor modelado em CAD. Um aspecto interessante é que essas alterações ocorrem em direções opostas nestas duas etapas. Assim, a princípio, o problema de aumento de dimensão durante o preenchimento, devido à deformação dos insertos, poderia ser minimizado através dos procedimentos de acabamento, através da remoção de material (redução da dimensão).

Ainda, observou-se que os insertos de aço mantêm faixas de tolerâncias mais justas que os de resina. Na moldagem por injeção de cera, observou-se também a necessidade de se utilizar uma técnica de refrigeração, mais com o intuito de diminuir o tempo de ciclo do que propriamente proteger a ferramenta, como ocorre na injeção de termoplástico. A razão disso é que a cera é um material pouco abrasivo e é injetado em condições favoráveis a aumentar a vida do inserto de resina (baixas pressões e temperaturas).

No experimento realizado com pós-metálicos (Anexo C), observou-se aderência excessiva entre a peça injetada e às superfícies da cavidade do inserto de resina. Em função disso, não foi possível extrair nenhuma peça sem que a mesma quebrasse.

Neste trabalho, alguns tipos de peças, de complexidade de formas geométricas diferentes, foram injetadas em materiais distintos (polipropileno, polietileno e cera), com uso de insertos de estereolitografia, indicando que o processo é viável. No entanto, isso é insuficiente para afirmar que é viável, tanto tecnicamente quanto economicamente, para a produção de peças com diversas formas geométricas, em diferentes tipos de materiais, haja visto que não abordou-se certas características existentes em peças injetadas, como, por exemplo, encaixes (*snap-fits*), ressaltos e cortes laterais, que requerem que o molde possua movimentos especiais, bem como não foram injetadas peças com materiais plásticos mais abrasivos (por exemplo, com carga de fibra de vidro).

6.2.SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Com o intuito de dar continuidade a novas pesquisas relacionadas ao tema em questão, faz-se aqui algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros na área:

- Desenvolver uma metodologia ou uma sistemática para a escolha adequada do processo de fabricação por camadas, ou de ferramental rápido, em função, por exemplo, da aplicação que o objeto construído terá (modelo, protótipo, peça ou ferramenta);
 - Desenvolver técnicas para otimizar preenchimento da parte de trás de insertos, visando ter maior controle sobre a formação de gases, na interface resina e material de preenchimento, no caso metais, assim como reduzir deformações durante essa etapa.
- Para isso, é também importante estudar o mecanismo de formação de gases;

- Avaliar o uso de outros materiais de preenchimento, cuja condutividade térmica seja maior que a do que o estanho, como, por exemplo, cobre e alumínio;
- Investigar quantitativamente a influência, na vida do inserto de estereolitografia, dos diversos fatores envolvidos, desde o projeto dos insertos (sistema de refrigeração, ponto de injeção, forma geométrica da peça, ângulo de saída, etc.) à moldagem das peças (parâmetros do processo de moldagem por injeção, força de extração, etc.);
- Neste trabalho, conforme comentado ao longo dos capítulos anteriores, a rugosidade superficial elevada, provocada pelo princípio da adição sucessiva de camadas de material, durante a fabricação dos insertos, tem influência tanto na qualidade da peça injetada como na vida do inserto. Assim, percebe-se a importância da realização de acabamento superficial. Contudo, isso é normalmente de forma manual e praticamente artesanal, sendo necessário desenvolver ou otimizar técnicas de acabamento, afim de reduzir a interferência humana na perda de qualidade (alterações significativas de desvios dimensionais). A medição da força de extração pode ser também um parâmetro para avaliar o acabamento do molde, durante a moldagem por injeção;
- Desenvolver e avaliar técnicas de recobrimento superficial das cavidades de insertos fabricados por estereolitografia, com o intuito de aumentar a resistência ao desgaste e melhorar o acabamento superficial;
- Avaliar a viabilidade do uso de líquidos refrigerantes sob alta pressão, utilizando técnicas de ferramental rápido, no processo de moldagem por injeção de cera para microfusão, e não somente termoplásticos, como proposto por [41].
- Verificar a viabilidade técnica do desenvolvimento de insertos de resina com presença de movimentos relativos complexos, para a injeção de termoplásticos;

- Desenvolver estudos comparativos entre processos de fabricação por camadas ou de ferramental rápido, em função, por exemplo, de aspectos econômicos e técnicos;
- Na injeção de pós-metálicos, utilizando insertos de resina (Anexo C), investigar os motivos da aderência excessiva entre a peça injetada e as superfícies da cavidade. Verificar também se esse tipo de material causa “microranhuras” no molde, comparando, através de, por exemplo, medições de rugosidade superficial ou por visualização em microscópio, antes e depois da moldagem. Utilizar outras composições de pós-metálicos com ligante, afim de reduzir a aderência;
- Desenvolver porta-moldes específicos para insertos fabricados por processos de ferramental rápido, possivelmente com recursos para a troca rápida do inserto, assim como para alterar, de forma fácil, as dimensões da área moldante e o posicionamento dos pinos extratores e da bucha de injeção;
- Investigar se peças injetadas, produzidas com uso de insertos de resina, possuem propriedades mecânicas diferentes daquelas produzidas em moldes de aço, em função da taxa de transferência de calor ser diferente;
- Verificar como a injeção de diferentes materiais termoplásticos (PP, PE, ABS, PS, etc.) influencia na vida de insertos de resina;
- Analisar o uso de insertos de resina, fabricados por estereolitografia, em processos como termoformagem e moldagem por sopro;
- Desenvolver uma sistemática para a utilização de sistemas CAE em moldes com insertos de resina, em função da modelagem do problema ser diferente em relação aos moldes de aço.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 JACOBS, P. F. **Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography**, *Society of Manufacturing Engineers*, Michigan, USA, 1992.
- 2 WHOLERS, T. **Rapid prototyping and tooling worldwide**, *Seção Técnica*, Congresso Internacional de Novas Tecnologias em Processos de Fabricação e Projeto de Máquinas, Joinville-SC, Brasil, Setembro-1999.
- 3 BYLINSKY, G. **Industry's amazing new instant prototypes**, *Fortune Magazine*, Time Inc., USA, January 12, 1998.
- 4 FOX, B. **Prepare for economic warfare**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 14-17, England, 1998.
- 5 NIELSEN, J. M. **Making life easier**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 80-83, England, 1998.
- 6 BAULY, J. and BERGH, D. **Product development: time to market**, *Manufacturing Engineer*, IEE, pp. 136-138, June 1993.
- 7 VOLPATO, N. **Prototipagem rápida e ferramental rápido no processo de desenvolvimento de produto**, *Máquinas e Metais*, Aranda Editora Técnica Ltda., São Paulo-SP, Brasil, pp. 76-89, Junho-1999.
- 8 MOORE, S. **Bridging tool puts parts in production promptly**, *Modern Plastics*, Vol. 76, Issue 5, New York, USA, May 1999.
- 9 PEARSON, R. E. **Use of rapid prototyping in the investment casting industry**, *Job Shop Technology Magazine*, USA, April 1994.
- 10 **QuickCast™: The direct-to-metal solution for time-sensitive manufactures**, *Brochure*, 3D Systems Inc., Valencia, California, USA, 1995.
- 11 DOLENC, A. **The art of CAD/CAM**, *Prototyping Technology International'98*, UK &

- Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 20-24, England, 1998.
- 12 FERREIRA, A. C. e LAFRATTA, F. H. **Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas**, *Plástico Industrial*, Editora Aranda, São Paulo, Brasil, Setembro-1998.
 - 13 BECKERT, B. A. **Refining rapid prototyping systems**, *Computer –Aided Engineering*, Vol. 18, Issue 4, USA, pp-30-36, April 1999.
 - 14 GOPALAKRISHNAN, R. V. and SUNDARAM, R. **India: compress cycle times to compete better**, *Businessline*, Islambad, India, Sep 8, 1999.
 - 15 GRIGSON, A. **Model making**, *Manufacturing Engineer*, pp. 172-176, August 1994.
 - 16 KRAUSE, F. L.; CIESLA, M.; STIEL, C. and ULBRICH, A. **Enhanced rapid prototyping for faster product development processes**, *Annals of the CIRP*, Volume 46/1, pp. 93-96, 1997.
 - 17 KRUTH, J. P. **Material in excess manufacturing by rapid prototyping techniques**, *Annals of the CIRP*, Vol. 40/2, pp. 603-615, 1991.
 - 18 BURNS, M. **Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing**, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs-NJ, USA, 1993.
 - 19 BURNS, M. **Automated Fabrication**, *Rapid Prototyping Journal*, MCB University Press, Volume 1, Number 1, 1995.
 - 20 JURRENS, K. K. **An Assessment of the State-of-the-Art in Rapid Prototyping Systems for Mechanical Parts**, *Final Report*, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, USA, 1993.
 - 21 KAI, C. C. and FAI, L. K. **Rapid prototyping – principles and applications in manufacturing**, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-1904-7, Singapore, 1997.
 - 22 **Rapid prototyping in Europe and Japan**, *Panel Report*, Japanese Technology

- Evaluation Center and World Technology Evaluation Center, JTEC-WTEC, March 1997.
- 23 GRIFFIN, A. **From computed tomography to CAD**, *Prototyping Technology*, UK & Int. Press, Issue 5, pp. 34, England, September 1998.
 - 24 SWANN, S. **Integration of MRI and stereolithography to build medical models: a case study**, *Rapid Prototyping Journal*, MCB University Press, Volume 2, Number 4, 1996.
 - 25 REES, M. **Art versus technology**, *Prototyping Technology*, UK & Int. Press, Issue 3, pp. 35-37, England, January/March 1998.
 - 26 REES, M. **What you see is what you get**, *Prototyping Technology*, UK & Int. Press, Issue 5, pp. 35, England, September 1998.
 - 27 PADOVANI, B. **Prototipagem rápida: uma visão dos mercados mundial e brasileiro**, *Seção Técnica*, Congresso Internacional de Novas Tecnologias em Processos de Fabricação e Projeto de Máquinas, Joinville-SC, Brasil, Setembro 1999.
 - 28 JACOBS, P. F. **Stereolithography and other RP&M technologies – from rapid prototyping to rapid tooling**, *Society of Manufacturing Engineers*, ASME Press, ISBN 0-87263-467-1, USA, 1996.
 - 29 MYERS, Y. and NORTON, J. **Rapid manufacturing with rapid tooling**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 30-34, England, 1998.
 - 30 SANSOUCY, M. R. **An investigation into the rapid manufacturing of insert-injection molded parts with the use of stereolithography cavities**, *Master Thesis*, Institute of Plastics Innovation, University of Massachusetts at Lowell, USA, 1996.
 - 31 PHAM, D. T., DIMOV, S. and LACAN, F. **Firm tooling – bridging the gap between hard and soft tooling**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN

- 1367-2436, pp. 196-203, England, 1998.
- 32 REES, M. **The arguments for color in RP**, *Prototyping Technology*, UK & Int. Press, Issue 4, pp. 36-40, England, April/June 1998.
 - 33 DICKENS, P.M. and KEANE, J. N. **Rapid manufacturing**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 209-212, England, 1998.
 - 34 BARALDI, U.; DORMAL, T.; DAM, J.L. **Choices for injection moulding**, *Prototyping Technology International'98*, UK & International Press, pp. 164-169, England, 1998.
 - 35 HARRINGTON, M.; HARTKOF, D. **Direct tooling for injection molding**, *RPMI Report*, Rapid Prototyping and Manufacturing Institute, Georgia Institute of Technology, USA, England, 1996.
 - 36 BLAIR, B.M. **Post-build processing of stereolithography molds**, *Master Thesis*, Georgia Institute of Technology, USA, May 1998.
 - 37 DICKENS, P.M. **Rapid tooling techniques**, *Proceedings of EuroMold'99 Conference*, *RP's Strategic Benefits and Risks*, Frankfurt, Germany, Dec. 1999.
 - 38 SAURKAR, S. **Rapid tooling: a study of cooling techniques for mold inserts used in the Direct AIM process**, *Master Thesis*, Institute of Plastics Innovation, University of Massachusetts at Lowell, USA, April 1998.
 - 39 McLAUGHLIN, R. M. Jr. **Structural analysis and design of ACES stereolithography inserts for rapid tooling of prototype injection molds**, *Master Thesis*, Institute of Plastics Innovation, University of Massachusetts at Lowell, USA, 1996.
 - 40 YUSUF, I. **ACES injection molding**, *Project Report*, Rapid Prototyping and Manufacturing Institute, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, 1997.
 - 41 LAFRATTA, F. H. **Avaliação da viabilidade do uso de líquidos refrigerantes sob alta pressão no processo de injeção de termoplásticos utilizando técnicas de rapid tooling**,

- Proposta de Tese*, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, 1997.
- 42 RAHMATI, S. and DICKENS, P. **Stereolithography for injection mould tooling**, *Rapid Prototyping Journal*, MCB University Press, Vol. 3, No. 2, pp. 53-60, 1997.
 - 43 KARAPATIS, N. P.; VAN GRIETHUYSEN, J. P. S. and GLARDON, R. **Direct rapid tooling: a review of current research**, *Rapid Prototyping Journal*, MCB University Press, Volume 4, Number 2, 1998.
 - 44 TODD, R. H.; ALLEN, D. K.; ALTING, L. **Manufacturing Processes Reference Guide**, ISBN 0-8311-3049-0, First Edition, Industrial Press Inc., New York, USA, 1994.
 - 45 **An introduction to Rapid Prototyping Using JP System 5**, JP System Web Site, <http://www.schroff.com/jpsystem5/> (acessado em 11/08/1999).
 - 46 **Why, when and how use RPT in the product development process**, Guide from EARP – European Action on Rapid Prototyping, BIBA/CRIF/DTI/IPA, June 1995.
 - 47 HEERMANN, T. **Virtual modelling and rapid product development**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 76-79, England, 1998.
 - 48 DOLENC, A. and MÄKELÄ, I. **Slicing procedures for layered manufacturing techniques**, *Technical Report*, Institute for Industrial Automation, Helsinki University of Technology, July 1992.
 - 49 KIRSCHMAN, C. F. and ALMONTE, C. C. J. **A parallel slicing algorithm for solid freeform fabrication processes**, *Proceedings of the 1992 Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, 1992.
 - 50 **Stereolithography buildstation – user guide**, 3D Systems Inc., Valencia, California, USA, June 1995.

- 51 WODZIAK, J. R.; FADEL, G. M. and KIRSCHMAN, C. **A genetic algorithm for optimizing multiple part placement to reduce build time**, *Technical Report*, CIDS L, Clemsom University, USA, 1993.
- 52 FRANK, D. and FADEL, G. **Expert system based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes**, *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping*, Dayton-OH, USA, pp. 191-200, 1994.
- 53 KIRSCHMAN, C. F. **Automated support structure design for stereolithography parts**, *Master Thesis*, Clemsom University, USA, May 1991.
- 54 GOMIDE, R. B.; GRELLMANN, D. A.; AHRENS, C. H. and FERREIRA, A. C. **Influência da pós-cura na resistência mecânica de peças de estereolitografia fabricadas com fotopolímero à base de epoxi**, *Anais do 5º Congresso Brasileiro de Polímeros*, Associação Brasileira de Polímeros, Águas de Lindóia-SP, Brasil, Nov-1999.
- 55 GOMIDE, R. B.; GREELMANN, D. A.; LAFRATTA, F. H.; AHRENS, C. H. e FERREIRA, A. C. **Avaliação da influência da etapa de pós-cura na resistência mecânica de peças de estereolitografia**, *VII Semana da Pesquisa*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, Setembro-1999.
- 56 BOURELL, D. L.; MARCUS, H. L.; BARLOW, J. W. and BEAMAN, J. J. **Selective laser sintering of metals and ceramics**, *The International Journal of Powder Metallurgy*, Vol. 28, No. 4, pp. 369-381, 1992.
- 57 KILLANDER, A. L. **Rapid mould: epoxy-infiltrated, laser inserts**, *Rapid Prototyping Journal*, MCB University Press, Volume 2, Number 3, 1996.
- 58 MARIA, R.B. **Relatório de Estágio I: Multibras Eletrodomésticos S.A. – Setor de Protótipos**, Depto. de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, Dez. 1998.

- 59 Stratasys Web Site, <http://www.stratasys.com/> (acessado em 26/09/1999).
- 60 **The Cubital Process**, *Brochure*, Cubital Ltd., Israel, 1997.
- 61 HELYSYS Official Web Site, <http://helisys.com> (acessado em 15/10/1999).
- 62 KLOSTERMAN, D.A.; CHARTOFF, R.P.; PRIORE, B. et al. **Structural composites via laminated object manufacturing**, *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Conference*, University of Texas, Austin, August 1996.
- 63 KLOSTERMAN, D.A.; CHARTOFF, R.P.; OSBORNE, N.R. et al. **Curved layer LOM of ceramics and composites**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 145-149, 1998.
- 64 **Kira Solid Center**, *Brochure*, Mikron Inc., Italy, 1999.
- 65 Sanders Prototype Web Site, <http://www.sanders-prototype.com/> (acessado em 10/11/1999).
- 66 SACHS, E.; CIMA, M., CORNIE, J. et al. **Three-dimensional printing: the physics and implications of additive manufacturing**, *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1, 1993.
- 67 SACHS, E.; CIMA, M., CORNIE, J. **Three-dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model**, *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, 1990.
- 68 ASHLEY, S. **Rapid prototyping systems**, *Mechanical Engineering*, pp. 34-43, April 1991.
- 69 JACOBS, P. F. **Recent advances in rapid tooling from stereolithography**, *White Paper*, 3D Systems Inc., Valencia, California, USA, 1997.
- 70 **Prototype injection molds with the RapidTool™ Process**, *Brochure*, DTM Corporation, Austin, Texas, USA, 1998.
- 71 HEJMADI, U.; MCALEA, K. **Selective laser sintering of metal molds: the Rapid Tool process**, *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas,

Texas, USA, pp. 97-104, 1996.

- 72 BARLOW, J.W.; BEAMAN, J.J.; BALASUBRAMANIAN, B. **A rapid mould-making system: material properties and design considerations**, *Rapid Prototyping Journal*, MCB University Press, Vol. 2, No. 3, pp. 4-15, 1996.
- 73 ARTHUR, A.; DICKENS, P. M. and COBB, R. C. **Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes**, *Rapid Prototyping Journal*, MCB University Press, Vol. 2, No. 1, 1996.
- 74 DICKENS, P. M. and SMITH, P. J. **Stereolithography tooling**, *Proceedings of 1st European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, University of Nottingham, pp. 309-317, July 1992.
- 75 SCHULTHESS, A. **New resin development for stereolithography electroless plating of SL parts**, *Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing Conference*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn-MI, USA, pp. 26-28, April 1994.
- 76 THROUP, S. C. and HIATT, T. **Applying rapid manufacturing techniques to the production of a thin-wall aluminum casting**, *Rapid News*, Time-Compression Prototyping, Vol. 2, Number 7, 1997.
- 77 JACOBS, P. F. **Recommended foundry procedure for shell investment casting using QuickCast™**, *Technical Report*, 3D Systems Inc., April 1993.
- 78 GREELMANN, D. A. **Avaliação do uso de modelos de estereolitografia na fabricação rápida de peças metálicas obtidas pelo processo de microfusão**, *Projeto de Dissertação*, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, Dez.-1998.
- 79 DENTON, K. R. and JACOBS, P. F. **QuickCast™ & rapid tooling: a case history at Ford Motor Company**, *Technical Report*, 3D Systems Inc., February 1994.

- 80 **3D Keltool™ for sintered metal tools**, *Technical Report*, 3D Systems Inc., 1995.
- 81 WHITWARD, L. **Getting to metal quicker with RP patterns**, *Design Engineering*, London, UK, pp. 39-42, January 1996
- 82 **Peças em Minutos®: Guia de seleção de poliuretanos**, *Catálogo*, Ciba Especialidades Químicas Ltda., São Paulo-SP, Brasil, 1997.
- 83 KAMPHUIS, K. and VANHIEL, B. **Rapid tooling for injection molding using casting resin**, *Project Report*, Rapid Prototyping and Manufacturing Institute, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, Spring 1997.
- 84 MALE, J. C. and TSANG, H. **A time, cost and accuracy comparison of soft tooling for investment casting produced using stereolithography techniques**, *Proceedings of 7th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, 1996.
- 85 YODICE, A. **Freeze Process Cuts Casting Costs**, *Advanced Materials & Processes*, Vol. 155, No. 5, pp. 35-36, April 1999.
- 86 **Direct AIM™ Course Guide**, *3D Systems Educational Center*, 3D Systems Inc., Valencia, California, USA, June 1997.
- 87 DECELLES, P. and BARRITT, M. **Direct AIM™ prototype tooling**, *Procedural Guide*, 3D Systems Inc., Valencia, California, USA, May 1997.
- 88 MENGES, G. and MOHREN, P. **How to make injection molds**, 2nd Edition, Hanser Publishers, ISBN 3-446-16305-0, New York, USA, 1993.
- 89 CEDORGE, T.; BAULT, Y.L.; PALMER, A. and COLTON, J. **Design rules for stereolithography injection molding inserts**, *Proceedings of 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Nottingham, UK, pp. 193-209, July 1999.
- 90 RAHMATI, S.; BROWN, S. and WYKES, C. **Failure mechanisms of stereolithography tooling**, *Proceedings of 8th European Conference on Rapid Prototyping and*

Manufacturing, Nottingham, UK, pp. 211-224, July 1999.

- 91 GOMIDE, R. B.; GREELMANN, D. A.; BEAL, V. E.; AHRENS, C. H. e FERREIRA, A. **C. Estudo de incerteza dimensional e absorção de umidade em peças fabricadas por estereolitografia**, *VII Semana da Pesquisa*, UFSC, Florianópolis-SC, Brasil, Setembro-1999.
- 92 **Cibatool® Resin Handbook**, *3D Systems Inc.*, Valencia, California, USA, Nov. 1997.
- 93 **Catálogo de resinas**, *DuPont/DSM SOMOS®*, EUA, Setembro-1999.
- 94 **Catálogo de resinas**, *RPC Ltd.*, Suíça, Maio 1999.
- 95 **FAX sobre proposta de orçamento**, *DuPont/DSM SOMOS®*, EUA, Setembro 1999.
- 96 SCHULTZ, J.W.; ULLET, J.S. and CHARTOFF, R.P. **Novel resins for stereolithography**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 178-181, England, 1998.
- 97 BRADY, G.A.; HALLORAN, J.W. **Stereolithography of ceramic suspensions**, *Proceedings of the 6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, University of Nottingham, UK, Jul. 1997.
- 98 HOPKINSON, N.; DICKENS, P. and HARRIS, R. **Layer thickness selection for stereolithography injection mould tooling**, *Proceedings of 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Nottingham, UK, pp. 79-93, July 1999.
- 99 RENAP, K. and KRUTH, J. P. **Recoating issues in stereolithography**, *Proceedings of the Fourth European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Belgirate, Italy, 1995.
- 100 WYATT, M. and DISHART, K. **Choosing a solvent to clean stereolithography parts**, *Prototyping Technology International'98*, UK & Int. Press, ISSN 1367-2436, pp. 107-109, 1998.

- 101 GREELMANN, D. A.; GOMIDE, R. B.; LAFRATTA, F. H.; AHRENS, C. H. e FERREIRA, A. C. **Desenvolvimento de um forno ultravioleta para pós-cura de peças fabricadas por prototipagem rápida através da estereolitografia**, *VII Semana da Pesquisa*, UFSC, Florianópolis-SC, Brasil, Setembro de 1999.
- 102 COLTON, J and BLAIR, B. **Experimental study of post-build cure of stereolithography polymers for injection molds**, *Rapid Prototyping Journal*, MCB University Press, Vol. 5, No. 2, pp. 72-81, 1999.
- 103 WONSILD, B.; JORGENSEN, T.H. and MOOS, N. **Test and development of manufacturing processes for injection moulding tools from RPT models**, *Proceedings of 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Nottingham, UK, pp. 235-252, July 1999.
- 104 **Catálogo de Produtos - Low Melting Alloys – Metspec 158 – for bridge tooling**, *MCP Systems Inc.*, Fairfield, CT, USA, 1998.
- 105 PARADIS, R. **A comparison of the conventional machined aluminum and rapid epoxy shell prototype mold building processes**, *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 8-17, March 1998.
- 106 **ASHRAE HANDBOOK 1993 – Fundamentals**, SI Edition, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*, ISBN 0-910110-97-2, USA, 1993.
- 107 FERREIRA, A.C.; AHRENS, C.H.; LAFRATTA, F.H.; GOMIDE, R.B. **Stereolithography tools for injection molding of wax patterns in the investment casting industry – a case study**, *Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing 2000*, Society of Manufacturing Engineers – SME, Chicago, IL, USA, April 2000.
- 108 CALLISTER JR., W.D. *Material science and engineering – an introduction*, 5th Edition,

John Wiley & Sons, Inc., USA, 1999.

ANEXO A – SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Neste trabalho, a temperatura dos insertos do Estudo de Caso 02 foi medida com o uso de um sistema de aquisição de dados, cujo desenho esquemático é apresentado na Figura 77, formado basicamente por:

- Termopar tipo “T” (faixa de medição nas faixas de 0 a 350°C);
- Voltímetro, com placa de aquisição de sinais, utilizado como instrumento de medição da diferença de potencial, em milivolts, captada pelo termopar;
- Microcomputador pessoal (*notebook PC*), para registrar a diferença de potencial, ao longo do tempo, medida pelo voltímetro.

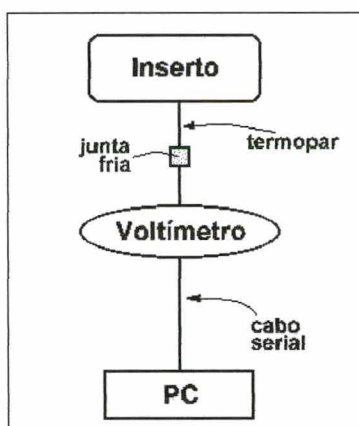


FIGURA 77 - Desenho esquemático do sistema de aquisição de dados

Devido a medição de diferença de potencial ser em função da diferença de temperatura (no inserto e na junta fria), é importante conhecer a temperatura da junta fria para então calcular a temperatura do inserto. Uma técnica comum [106], também utilizada neste trabalho, é manter a junta em uma temperatura conhecida, como, por exemplo, imersa em uma mistura de água e gelo (0°C).

ANEXO B – PRINCIPAIS FABRICANTES DE SISTEMAS DE FABRICAÇÃO POR CAMADAS

Processo	Princípio de funcionamento	Ferramenta utilizada	Fabricante de equipamentos	Equipamento	Tipos de materiais utilizados	Principais aplicações	
Estereolitografia (SL)	Cura seletiva	Laser ultravioleta	3D Systems (EUA) Mitsubishi/CMET (Japão) Mitsui (Japão) Denken (Japão) D-MEC/Sony (Japão) Teijin Seiki (Japão) Meiko (Japão) Fockele&Schwarse (Alemanha) Ushio (Japão) Aaroflex (EUA)	SLA SOLUP COLAMM SLP SCS Soliform Meiko LMS UniRapid Solid Imager	Fotopolímeros à base de epoxi ou acrílico	Protótipos de visualização Protótipos de engenharia Moldes de injeção Modelos p/ microfusão	www.3dsystems.com
Sinterização a laser seletivo (SLS)	Sinterização seletiva	Laser de CO ₂	DTM (EUA) EOS (Alemanha)	Sinterstation EOSint	Metal Polímero Cerâmica	Protótipos de visualização Protótipos de engenharia Moldes de injeção Modelos p/ microfusão	www.dtm-corp.com www.eos-gmbh.de
Fusão e deposição de materiais (FDM)	Deposição contínua	Cabeçote de extrusão	Stratasys (EUA)	FDM	ABS Elastômero Poliéster Cera	Protótipos de visualização Modelos p/ microfusão	www.stratasys.com
Solid Ground Curing (SGC)	Cura seletiva	Máscara óptica	Cubital (Israel)	Solider	Fotopolímeros à base de epoxi ou acrílico	Protótipos de visualização Protótipos de engenharia Moldes de injeção Modelos p/ microfusão	www.cubital.com
Laminação de objetos para modelos (LOM)	Laminação	Laser de CO ₂ e rolo de laminação	Helisys (EUA) Sparx AB (Suécia)	LOM HotPlot	Papel	Protótipos de visualização Modelos p/ fundição em areia	helisys.com

(continua na próxima página)

(continuação)

Processo	Princípio de funcionamento	Ferramenta utilizada	Fabricante de equipamentos	Equipamento	Tipos de materiais utilizados	Principais aplicações	
Tecnologia de laminação de papel (PLT)	Laminação	Corte mecânico e SAHP	KIRA (Japão)	KSC	Papel	Protótipos de visualização Modelos p/ fundição em areia	www.kiracorp.co.jp
JP System 5 (JPS)	Laminação	Corte mecânico e posicionamento manual das camadas	Schoroff (EUA)	JP System 5	Papel	Protótipos de visualização Modelos p/ fundição em areia	www.schroff.com/jpsyst em5
Impressão de objetos sólidos (SOP)	Deposição "gota a gota"	Mecanismo "jato de tinta"	3D Systems Sanders	Actua/Termojet Model Maker	Cera	Protótipos de visualização Modelos p/ microfusão	www.3dsystems.com www.sanders-prototype.com
Impressão tridimensional (3DP)	Deposição "gota sobre o pó"	Mecanismo "jato de tinta"	Soligen/MIT (EUA) Z Corp/MIT (EUA)	DSPC Z	Cera Cerâmica	Protótipos de visualização Moldes de cerâmica	www.partsnow.com www.zcorp.com
LENS	Deposição "gota a gota"	Cabecote a laser	Optomec (EUA)	LENS	Metal	Protótipos de visualização Protótipos de engenharia Ferramental rápido Manutenção de peças metálicas	www.optomec.com
Fabricação Topográfica de Sólidos (TSF)	Deposição "gota sobre o pó"	Mecanismo "jato de tinta"	Formus (EUA)	TSF	Composito	Protótipos de grandes dimensões	www.formus.com

ANEXO C – EXPERIMENTO DE MOLDAGEM DE PÓS-METÁLICOS POR INJEÇÃO COM USO DE INSERTOS DE RESINA

C1. INTRODUÇÃO

Adicionalmente aos estudos de caso realizados neste trabalho, descritos no Capítulo 4, foi realizada uma tentativa de utilizar insertos de resina, produzidos por estereolitografia, no processo de moldagem de pós-metálicos por injeção (PIM, *Powder Injection Molding*). O objetivo foi identificar possíveis limitações, visando sugerir linhas de pesquisa nesta área, dada a importância deste processo no Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC, através do núcleo PAT/PRONEX, assim como no próprio mercado nacional.

C2. DEFINIÇÃO DA PEÇA 07

Em função de não ter sido encontrado referências sobre o uso de insertos fabricados por estereolitografia para a injeção de pós-metálicos, foi selecionada uma peça de formas geométricas consideradas bastante simples, para reduzir a complexidade do experimento. Todavia, foram também consideradas as limitações da máquina injetora e do porta-moldes disponíveis. A peça definida possui forma de um paralelepípedo (Figura 78), com comprimento de 52 mm, 11 mm de largura e 3,6 mm de espessura. Raios de arredondamento foram incorporados nos cantos vivos do peça.

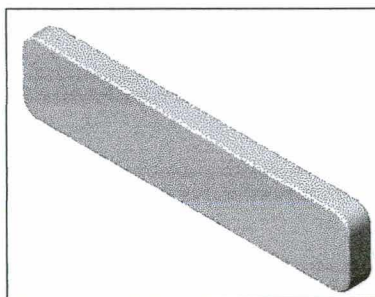


FIGURA 78 - Peça 07 (imagens do CAD)

C3. PROJETO DO INSERTOS

As dimensões externas dos insertos (Figura 79) foram as mesmas dos estudos de caso 01 e 02 (Capítulo 4), uma vez que foi utilizado o mesmo porta-moldes. Um ângulo de saída de 5° foi incorporado tanto no lado móvel do molde quanto no fixo. Assim como nos insertos para moldagem de termoplásticos, não foi utilizada extração automática, sendo mantido apenas o sistema de extração do material que permanece no interior da bucha (poço frio). A espessura de casca dos insertos foi de 2,0 mm e, na parte de trás, foram igualmente incorporadas nervuras para aumentar sua resistência, distribuídas uniformemente. A técnica de refrigeração adotada foi a instalação de tubos de cobre. Na geração dos arquivos STL, a resolução adotada foi a mesma utilizada no estudo de caso 01.

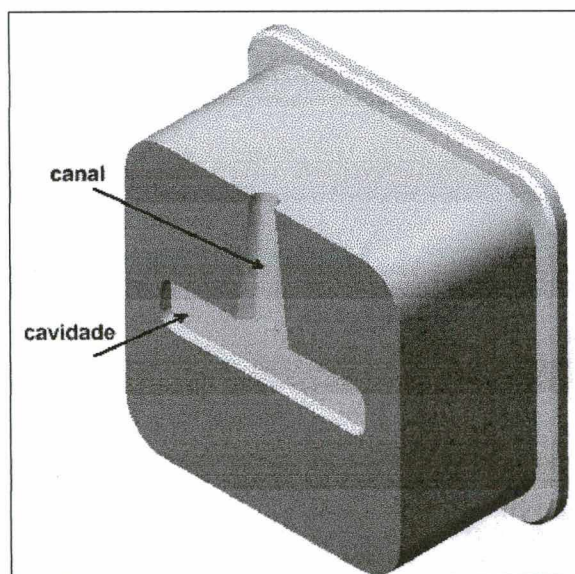


FIGURA 79 - Insertos do experimento com moldagem de pós-metálicos (imagens do CAD)

C4. FABRICAÇÃO DOS INSERTOS

Um conjunto de insertos, composto por duas cavidades (uma para a placa fixa e outra para a móvel), foi fabricado neste estudo de caso. Na etapa de orientação espacial, a região

moldante foi orientada para cima, da mesma forma como nos estudos de caso realizados. Foi adotada a geração automática de suportes, porém com posterior alterações, como a remoção das cantoneiras e adição de suportes em regiões críticas ou não suportadas suficientemente. Foi utilizado o estilo de construção *ACES*, cujos parâmetros foram apresentados na Tabela 6, baseando-se na resina de estereolitografia usada. Os parâmetros de recobrimento foram os mesmos utilizados no estudo de caso 2.

C5. PREPARAÇÃO DOS INSERTOS

Os insertos passaram por uma etapa de pós-processamento, onde foi realizada a remoção de suportes, limpeza, pós-cura e acabamento superficial. Os procedimentos de lixamento e polimento foram análogos aos utilizados nos insertos para moldagem de cera para microfusão. Uma liga de estanho foi utilizada para fazer o preenchimento da parte traseira, sendo que tubos de cobre, para refrigeração, foram conformados e posicionados no interior. Uma etapa para nivelar a superfície preenchida, através de usinagem, foi realizada.

C6. INJEÇÃO DAS PEÇAS E RECOMENDAÇÕES

Após a montagem do molde na máquina injetora, iniciou-se o experimento para a moldagem de pós-metálicos por injeção. Por não se conhecer os parâmetros de injeção adequados, o perfil de injeção foi alterado durante alguns ciclos, com o objetivo de se encontrar o ajuste adequado. Para auxiliar a extração, foram utilizados agente desmoldante, à base de silicone, e jato de ar comprimido, ambos aplicados manualmente.

Embora tenha sido escolhida uma peça de forma geométrica considerada bastante simples e utilizado ângulo de saída relativamente grande (5 graus), observou-se que a mesma adere-se muito às superfícies do inserto. Ainda, em função da fragilidade do material após a moldagem por injeção, por estar no estado metalúrgico conhecido por “verde”, não foi possível extrair peças sem defeitos. Todas as peça quebraram, seja durante a abertura do molde ou na extração.

Contudo, o motivo da aderência excessiva não foi descoberto. Acredita-se que o pó-metálico, por ser abrasivo, provoca “micro-ranhas”, durante a injeção, nas superfícies do inserto de resina, que possui baixa resistência à abrasão. Essas micro-ranhas seriam então responsáveis por aumentar a aderência.

Algumas sugestões para facilitar a extração da peça, que poderiam ser avaliadas em outros trabalhos, são:

- Melhorar o acabamento superficial do inserto;
- Procurar utilizar outros tipos de agentes desmoldantes;
- Utilizar sistema de extração automático;
- Aumentar o ângulo de saída;
- Utilizar técnicas de recobrimento superficial do inserto;
- Procurar alterar a composição da mistura de pó-metálico com ligante; e
- Utilizar outros tipos de resinas de estereolitografia.

ANEXO D – EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

D1. EQUIPAMENTOS

(i) Máquina de estereolitografia

- Fabricante: 3D Systems Inc. (Califórnia, EUA);
- Modelo: SLA-250/30;
- Laser: Hélio-Cádmio (comprimento de onda de 325 nm, potência de 30 mW e diâmetro do feixe de 0,25 mm);
- Sistema de recobrimento: *Sweep blade*;
- Computador: *PC Pentium® 166 Mhz, 16 Mb RAM, sistema NFS-DOS*;
- Volume de trabalho: 250 x 250 x 250 mm.

(ii) Máquina injetora 1 (utilizada na produção das peças de plástico e de pós-metálicos)

- Fabricante: Arburg (Alemanha);
- Modelo: Allrounder 320S-500-150, com unidades injetoras para plástico e pós-metálicos;
- Local de instalação: Depto. de Engenharia Mecânica - UFSC;

(iii) Máquina injetora 2 (utilizada na produção das peças de cera)

- Local de instalação: Precicast – Fundição de Precisão Ltda. (São José, SC);
- Fabricante/Modelo: Não fornecido pela empresa.

(iv) Porta-moldes 1 (utilizado na produção das peças de plástico e de pós-metálicos)

- Fabricante: doado pela Escola Técnica Tupy – Joinville/SC;
- Tipo: molde de duas placas;
- Área moldante das placas porta-cavidades (área disponível para inserto): 130 x 260 mm;

- Altura do inserto: 40 mm para placa-fixa (fêmea) e 30 mm para placa-móvel (macho);
- Bucha de injeção: no centro da área moldante, com diâmetro de 16 mm;
- Observação: porta-moldes já utilizado previamente, no caso para a produção de outro tipo de peça em relação às produzidas nos estudos de caso deste trabalho.

(v) Porta-moldes 2 (utilizado na produção das peças de cera)

- Proprietário: empresa Precicast – São José/SC;
- Tipo: molde de duas placas, com duas cavidades;
- Área disponível para inserto (cada cavidade): círculo de diâmetro 150 mm.

(vi) Fresadora CNC (usada na fabricação dos postigos metálicos, para redução da área moldante do porta-moldes 1, Figura 44)

- Fabricante: ROMI;
- Modelo: F400;
- Comando: MACH7, Diadur.

(vii) Fresadora universal (usada na usinagem da parte traseira dos insertos)

- Fabricante: VEB Werkzeugmaschinenfabrik;
- Modelo: FUW 315x800/I.

(viii) Sistema de aquisição de dados

- Composto basicamente por:
 - Computador pessoal: *Notebook IBM 486DX2-66*, 16 Mb RAM, sistema Windows®95;
 - Multímetro com placa de aquisição de sinais: *Hewlett Packard Multimeter 34401A*;
 - Termopar: tipo T.

(ix) Câmara de cura por ultravioleta

- Fabricante: desenvolvido no CIMJECT [101];
- Volume de trabalho: 500 x 400 x 700 mm;
- Potência máxima: 400W (10 lâmpadas ultravioletas TLK40W/05).

(x) Programa *Maestro*

- Fabricante: 3D Systems Inc. (Califórnia, EUA);
- Versão: SGI 1.9.1;
- Plataforma utilizada: *Silicon Graphics Octane®*, sistema *Irix 6.4*.

(xi) Programa *SolidWorks*

- Fabricante: SolidWorks Corporation (EUA);
- Versão: 1998 Plus;
- Plataforma utilizada: *Dual PentiumII® 400 Mhz, 384 Mb RAM, Windows®NT*.

(xii) Programa *CMOLD – 3D QuickFill*

- Fabricante: Advanced CAE Technology, Inc. (EUA);
- Versão: NT-99.7.

D2. MATERIAIS**(i) Resina de estereolitografia**

- Fabricante: Ciba / 3D Systems Inc. (Califórnia, EUA);
- Especificação: Cibatool®SL-5170.

(ii) Polipropileno

- Fabricante: OPP (Brasil);
- Especificação: PP-RP347.

(iii) Polietileno

- Fabricante: Ipiranga Petroquímica (Brasil);

- Tipo: Alta densidade (HDPE).

(iv) Cera para microfusão

- Fabricante: preparada e fornecida pela empresa **Precicast**;
- Composição: não divulgada, por motivos de propriedade industrial.

(v) Composto de pó-metálico com ligantes para injeção

- Fabricante: SteelInject (Brasil);
- Especificação: 316L HMB1-91,3.

(vi) Liga metálica *Metspec*

- Fabricante: MCP SYSTEMS INC. (EUA);
- Especificação: Metspec-217;
- Composição (dados de catálogo): Bismuto (54% em peso), estanho (26%) e cádmio (20%).

(vii) Liga de Estanho

- Especificação: 60x40;
- Composição: Estanho (60%) e chumbo (40%);
- Ponto de fusão: 183°C;
- Condutividade térmica: 50 W/m.K [108].

(viii) Liga de estanho com bismuto

- Composição aproximada (em volume): liga de estanho (70%) acrescentada de bismuto (30%), preparada no CIMJECT.

(ix) Tubos de cobre para refrigeração

- Diâmetro externo: 6,5 mm;
- Espessura de parede: 0,9 mm.